

Herstellung und Steuerung der Verarbeitbarkeitseigenschaften selbstverdichtender Betone

von Diplom-Ingenieur
Stefan Kordts
aus Emsdetten

von der Fakultät VI – Bauingenieurwesen und angewandte Geowissenschaften
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
– Dr.-Ing. –

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. M. Schlaich
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. B. Hillemeier
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. G. Thielen

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 10. Februar 2005

Berlin 2005
D 83

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand zwischen den Jahren 1999 bis 2004 am Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf, im Rahmen eines Stipendiums der Wissenschaftsstiftung der deutschen Zementindustrie „Gerd-Wischers-Stiftung“ im Verein Deutscher Zementwerke e.V. Dem Verein Deutscher Zementwerke e.V. und seiner Geschäftsführung danke ich für die Förderung der Arbeit und die Möglichkeit, die Ergebnisse der Untersuchungen für eine Dissertation zu nutzen.

Die Dissertation wurde betreut von Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerd Thielen. Ihm und den Herren Dr.-Ing. Wolfgang Breit, Prof. Dr.-Ing Horst Grube und Dr.-Ing. Eberhard Siebel gilt mein besonderer Dank für die wertvollen Diskussionen sowie die Unterstützung bei der Durchführung der Untersuchungen.

Daneben gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Hillemeier für sein Interesse an meiner Arbeit und die wertvollen Anregungen bei der Abfassung der Dissertationsschrift.

Bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Forschungsinstitutes, insbesondere denen der Abteilung Betontechnik, möchte ich mich für die Unterstützung bei den Versuchen und für die Diskussionsbereitschaft bedanken.

Mein besonderer Dank gilt der deutschen Zementindustrie, die mit der Gründung der Gerd-Wischers-Stiftung diese Arbeit erst ermöglicht hat.

Einige Ergebnisse dieser Arbeit stammen aus Forschungsvorhaben, die durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF) mit Mitteln der Bundesministerium für Wirtschaft finanziert wurden. Ein weiterer Teil wurde durch die Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. (FTB) gefördert. Beiden Einrichtungen sei hierfür gedankt.

Düsseldorf, Februar 2005

Stefan Kordts

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Ziel der Arbeit.....	2
3	Stand der Kenntnis	4
3.1	Selbstverdichtender Beton	4
3.1.1	Eigenschaften des selbstverdichtenden Betons	4
3.1.2	Rezepturenentwicklungsverfahren für selbstverdichtenden Beton	5
3.1.2.1	Allgemeines	5
3.1.2.2	Mehlkornotyp	5
3.1.2.3	Stabilisierertyp	6
3.1.2.4	Kombinationstyp	7
3.1.3	Einflüsse auf die Verarbeitbarkeit selbstverdichtender Betone	7
3.1.4	Festbetoneigenschaften selbstverdichtender Betone	8
3.1.5	Zusammenfassung	8
3.2	Fließverhalten zementhaltiger Suspensionen	9
3.2.1	Rheologische Grundlagen und Modelle	9
3.2.1.1	Allgemeines	9
3.2.1.2	Newtonsche Flüssigkeiten	9
3.2.1.3	Plastische Stoffe	11
3.2.1.4	Rheologische Modelle für Zementleim	12
3.2.1.5	Rheologische Modelle für Mörtel und Beton	14
3.2.2	Prüfverfahren zur rheologischen Beschreibung	15
3.2.2.1	Rheologische Prüfparameter	15
3.2.2.2	Rheometrische Prüfverfahren für Zementleim und Mörtel	15
3.2.2.3	Rheometrische Prüfverfahren für Beton	17
3.2.2.4	Rheologische Ersatzkenngrößen – Konsistenz von Beton	19
3.2.3	Schlussfolgerungen	20
3.3	Einfluss von mehlfinen Stoffen auf die Verarbeitbarkeit	21

3.3.1	Allgemeines	21
3.3.2	Granulometrische Grundlagen	22
3.3.3	Einfluss von Hohlraumfüllung und Mindestwassergehalt auf die Verarbeitbarkeit	24
3.3.4	Einfluss der Hydratation des Zements auf die Verarbeitbarkeit	27
3.3.4.1	Allgemeines	27
3.3.4.2	Hydratation des Zements.....	27
3.3.4.3	Erstarrungsoptimierung von Zement.....	28
3.3.5	Einfluss der Struktur von Mehlkornsuspensionen auf die Verarbeitbarkeit	31
3.3.5.1	Allgemeines	31
3.3.5.2	Kapillarkräfte	32
3.3.5.3	Interpartikuläre Kräfte.....	32
3.3.5.4	Gewichtskraft	36
3.3.5.5	Brownsche Bewegung.....	36
3.3.5.6	Schlussfolgerungen	37
3.4	Einfluss von Fließmitteln auf die Verarbeitbarkeit	37
3.4.1	Allgemeines	37
3.4.2	Wirkungsweise von Polykondensaten.....	38
3.4.3	Wirkungsweise von Polycarboxylatethern.....	39
3.4.4	Steuerung der Verarbeitbarkeit durch Fließmittel.....	41
4	Vorgehensweise	43
5	Untersuchungen zur Mehlkornoptimierung	45
5.1	Allgemeines.....	45
5.2	Art des Mehlkorns und der Mehlkorngemische	46
5.2.1	Verwendete mehlfeine Stoffe.....	46
5.2.2	Mehlkorngemische.....	47
5.2.2.1	Inerte und weitgehend inerte Mehlkorngemische	47
5.2.2.2	Reaktive Mehlkorngemische.....	49

5.3	Chemisch-mineralogische Charakterisierung der mehlfeinen Stoffe	50
5.4	Physikalische Charakterisierung der mehlfeinen Stoffe	51
5.5	Granulometrische Charakterisierung der mehlfeinen Stoffe und Mehlkorngemische	51
5.5.1	Allgemeines	51
5.5.2	Korngrößenverteilung	51
5.5.3	Optische Charakterisierung	51
5.5.4	Wasseranspruch mit dem β_p -Wert-Verfahren	52
5.5.5	Quecksilberdruckporosimetrie	53
5.5.6	Rotationsrheometer	54
5.6	Ergebnisse und Bewertung	56
5.6.1	Inerte und weitgehend inerte mehlfeine Stoffe und Mehlkorngemische	56
5.6.1.1	Allgemeines	56
5.6.1.2	Optische Charakterisierung	57
5.6.1.3	Sieblinien	59
5.6.1.4	Einfluss der Kornverteilung auf den Hohlraumgehalt	61
5.6.1.5	Einfluss des Hohlraumgehalts auf den Wasseranspruch und die Suspensionseigenschaften	62
5.6.1.6	Zusammenfassung	65
5.6.2	Reaktive mehlfeine Stoffe und Mehlkorngemische	67
5.6.2.1	Allgemeines	67
5.6.2.2	Optische Charakterisierung	67
5.6.2.3	Sieblinien	68
5.6.2.4	Einfluss der Kornverteilung auf den Hohlraumgehalt	68
5.6.2.5	Einfluss des Hohlraumgehalts auf den Wasseranspruch und die Suspensionseigenschaften	70
5.6.2.6	Zusammenfassung	72
5.7	Abschätzung des Startwassergehalts	74
6	Untersuchungen zur Verflüssigung zementhaltiger Suspensionen	76

6.1	Allgemeines.....	76
6.2	Wirkungsweise ausgewählter Fließmittel in Leim- und Mörtelsystemen	76
6.2.1	Allgemeines	76
6.2.2	Verwendete Fließmittel.....	77
6.2.3	Physikalische Charakterisierung der Fließmittel.....	77
6.2.4	Untersuchungen zum Sättigungsverhalten der Fließmittel in Zementleimen	77
6.2.5	Untersuchungen zum Ansteifverhalten von Mörteln in Abhängigkeit vom Fließmittel	80
6.2.6	Bewertung der Ergebnisse	81
6.2.6.1	Allgemeines	81
6.2.6.2	Einfluss des Fließmittels auf das Sättigungsverhalten von Zementleim	81
6.2.6.3	Einfluss des Fließmittels auf die zeitabhängige Verflüssigung von Mörtel.....	83
6.2.7	Zusammenfassung.....	85
6.3	Verflüssigung selbstverdichtender Mörtel.....	86
6.3.1	Übertragbarkeit von Mörtel- auf Betonprüfungen	86
6.3.2	Zusammensetzungen und Herstellung der Mörtel.....	87
6.3.3	Untersuchung der Verflüssigung im Rotationsrheometer	89
6.3.4	Untersuchung der Verflüssigung mit rheologischen Ersatzkenngrößen.....	91
6.3.5	Untersuchung der Verflüssigung über optische Charakterisierung von Probekörpern.....	93
6.3.6	Bewertung der Ergebnisse der Mörteluntersuchungen	94
6.3.6.1	Allgemeines	94
6.3.6.2	Zusammenhang zwischen rheometrischen Kenngrößen und rheologischen Ersatzkenngrößen.....	94
6.3.6.3	Sättigungsverhalten der selbstverdichtenden Mörtel.....	95
6.3.7	Charakterisierung der Verarbeitbarkeitseigenschaften selbstverdichtender Mörtel.....	96
6.3.8	Zusammenfassung.....	99
6.4	Verflüssigung selbstverdichtender Betone.....	100

6.4.1	Allgemeines	100
6.4.2	Zusammensetzung der Betone	100
6.4.3	Prüfverfahren	104
6.4.3.1	Setzfließmaß.....	104
6.4.3.2	Trichterauslaufzeit.....	105
6.4.3.3	Fließzeit.....	105
6.4.3.4	Optische Charakterisierung von Probekörpern	106
6.4.3.5	Blockierring-Prüfung	106
6.4.3.6	Box-Test.....	107
6.4.4	Herstellung der Betone und Prüfreihefolge.....	108
6.4.5	Einfluss der Verflüssigung auf Verarbeitbarkeitseigenschaften selbstverdichtender Betone	108
6.4.5.1	Allgemeines	108
6.4.5.2	Verarbeitbarkeitseigenschaften von SVB 1.....	109
6.4.5.3	Verarbeitbarkeitseigenschaften von SVB 2.....	112
6.4.5.4	Verarbeitbarkeitseigenschaften von SVB 3.....	114
6.4.5.5	Verarbeitbarkeitseigenschaften von SVB 4.....	116
6.4.5.6	Verarbeitbarkeitseigenschaften von SVB 5.....	120
6.4.6	Zusammenfassung.....	121
6.5	Einfluss der Temperatur auf die Verflüssigung.....	123
6.5.1	Allgemeines	123
6.5.2	Einfluss der Temperatur auf die Verflüssigung selbstverdichtender Mörtel.....	124
6.5.3	Einfluss der Temperatur auf die Verarbeitbarkeit selbstverdichtender Betone	127
6.5.4	Zusammenfassung.....	130
7	Modifizierter Mischungsentwurf	131
7.1	Allgemeines.....	131
7.2	Festlegung der Mischungszusammensetzung.....	133
7.3	Startwassergehalt.....	133
7.4	Wirkungsweise des Fließmittels.....	134

7.5	Fensterlösung	135
7.6	Steuerung der Verarbeitbarkeit	137
7.6.1	Allgemeines	137
7.6.2	Abweichung vom optimalen Wassergehalt.....	137
7.6.3	Variation des Fließmittelgehalts	137
7.6.4	Einstellung der Verarbeitbarkeit auf die Temperatur.....	138
7.6.5	Korrekturmaßnahmen	139
7.7	Zusammenfassung	140
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	141
9	Formelzeichen	144
10	Literatur	146
11	Anhang.....	161
11.1	Anhang A, Ergebnisse der physikalisch-chemischen Untersuchungen an den mehlfeinen Stoffe	161
11.2	Anhang B, Ergebnisse der granulometrischen Untersuchungen an den mehlfeinen Stoffe	164
11.3	Anhang C, Untersuchungen an ausgewählten Fließmitteln	168
11.4	Anhang D, Untersuchungen an selbstverdichtenden Mörteln	173
11.5	Anhang E, Untersuchungen an selbstverdichtenden Betonen	177
11.6	Anhang F, Untersuchungen an selbstverdichtenden Mörteln und Betonen in unterschiedlichen Temperaturbereichen	180

1 Einführung

Die Leistungsfähigkeit eines Betons zeigt sich in definierten Eigenschaften. Diese lassen sich in Frisch- und Festbetoneigenschaften unterteilen. Zu den Festbetoneigenschaften zählen neben einer ausreichenden Festigkeit der Elastizitätsmodul, das Schwinden, der Widerstand gegen Carbonatisierung und chemische Angriffe oder der Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstand. Die Festbetoneigenschaften, die über die planmäßige Nutzungsdauer des Bauwerks erwartet werden, müssen in der Zusammensetzung des Frischbetons angelegt sein, z. B. durch einen ausreichend niedrigen Wasserzementwert, eine gesteuerte Porosität sowie durch einen hinreichenden mechanischen oder chemischen Widerstand aller Bestandteile.

Da eine quasi vollständige Verdichtung des Frischbetons erforderlich ist, um die planmäßig angelegten Festbetoneigenschaften zu erreichen, müssen die üblichen Konstruktionsbetone gemäß DIN EN 206-1/DIN 1045-2 durch Rütteln verdichtet werden. Sie sind so konzipiert, dass ein möglichst großer Volumenanteil von rund 70 Vol.-% durch ein Korngerüst mit Körnern größer 0,125 mm ausgefüllt wird. Das Mehlkorn, bestehend aus Zement, Zusatzstoffen und Gesteinskörnungsanteilen mit einem Korndurchmesser kleiner 0,125 mm bildet mit dem Wasser und gegebenenfalls Zusatzmitteln den Leim. Er füllt das Restvolumen innerhalb des Gesteinskörnungsgerüsts als erhärtender „Kleber“ vollständig aus, nachdem das gröbere Gesteinskörnungsgerüst des Betons innerhalb der Schalung durch intensive Verdichtung in seine dichteste Lage gebracht wurde. Ein gewisser Leimüberschuss ist stets erforderlich, um schlecht verdichtete, haufwerksporige Bereiche zu vermeiden. Die Verdichtung durch Rütteln muss bei der Planung des Bauteils bereits berücksichtigt werden. So müssen der Bewehrungsgrad und die Bewehrungsführung auf die Einbaubedingungen und das Bauteil abgestimmt werden.

Durch die Fortschritte auf dem Gebiet der verflüssigenden Zusatzmittel lassen sich mittlerweile die Eigenschaften Konsistenz und Festigkeit fast vollständig voneinander entkoppeln. Betone mit niedrigen Wasserzementwerten lassen sich durch Hochleistungsfließmittel bei sachgerechter Dosierung in weiche bzw. „fließfähige“ Konsistenzen überführen. So lassen sich Betone mit hoher Festigkeit und Dichtheit erzielen. Die Entwicklung der Zusatzmittel spiegelt sich auch in der Ausweitung der Konsistenzbereiche von F1 bis F6 in DIN EN 206-1/DIN 1045-2 wider. Waren bis vor rund 30 Jahren steife und plastische Stampf- und Rüttelbetone mit ihrem extremen Aufwand an Arbeits- und Verdichtungsenergie aus Festigkeitsgründen normal, werden heute weitgehend weiche Betone des Konsistenzbereichs F3 bzw. F4 eingesetzt. Die planmäßige Steuerung der Ver-

arbeitbarkeit des Rüttelbetons und der Verarbeitbarkeitszeit auf der Baustelle durch Betonzusatzmittel wurde in langjähriger Arbeit auf den heutigen hohen Stand gebracht. Die Frisch- und Festbetoneigenschaften können anhand einfacher Eignungsprüfungen zielsicher vorausgeplant werden.

Das fehlerfreie Einbauen von Rüttelbeton erfordert jedoch gut geschultes, qualifiziertes Personal. Haufwerksporige Fehlstellen - sogenannte „Kiesnester“ - in Betonbauteilen infolge unzureichender und fehlerhafter Verdichtung oder infolge Sedimentation stellen immer noch ein häufig auftretendes Qualitätsproblem dar. Des Weiteren werden durch den hohen Verdichtungs- und Verarbeitungsaufwand die Einbauleistungen und zum Teil durch den entstehenden Rüttlerlärm die Einbauzeiten begrenzt, was sich in den Baukosten und in der Bauzeit eines Gebäudes oder Bauteils niederschlägt. Zunehmend werden durch neue architektonische Konzepte wieder hohe Anforderungen an die Betonoberfläche gestellt und häufig Sichtbetonqualität verlangt. Dabei sind durch das Einbauverfahren bedingt nicht selten die Schüttgrenzen sichtbar. Ebenfalls kann es zu unterschiedlichen Farbgebungen des Betons innerhalb eines Betonierabschnittes kommen, die durch variierende Wasserzementwerte und durch mehr oder weniger intensives Rütteln hervorgerufen werden.

Um die oben genannten Probleme beim Einbau von Beton zu vermeiden, können durch die volle Nutzung der Möglichkeiten des 5-Stoff-Systems Beton (Zement, Gesteinskörnung, Zusatzmittel, Zusatzstoff, Wasser) Betone entworfen werden, die selbsttätig unter dem Einfluss der Schwerkraft bis zum Niveausgleich sedimentationsfrei fließen, während des Fließens entlüften und dabei jeden Hohlraum und alle Bewehrungszwischenräume innerhalb einer Schalung ausfüllen. Diese Betone werden „Selbstverdichtende Betone“ (SVB) genannt.

2 Ziel der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, das experimentelle Rezepturenentwicklungsverfahren für SVB so zu modifizieren, dass gezielt die Frischbetoneigenschaften sowohl nach dem Mischungsende als auch über die geplante Verarbeitbarkeitszeit über einen rationalen Mischungsentwurf optimiert und gesteuert werden können. Um die vorhandenen empirischen Rezepturenentwicklungsverfahren zu vereinfachen und Kriterien für die zielgerichtete Mischungszusammensetzung zu erstellen, liegen zur Zeit nicht ausreichende Kenntnisse über wesentliche Parameter vor, siehe Abschnitt 3. Daher müssen die folgenden Aufgabenstellungen bearbeitet werden:

- Die Verarbeitbarkeit eines SVB hängt von den verwendeten Ausgangsstoffen ab. Durch normative Festigkeits- und Dauerhaftigkeitsforderungen wie der Mindestzementgehalt und der höchstzulässige Wassorzementwert wird in erster Linie die Mehlkorn- und Leimzusammensetzung beeinflusst. Um im Rahmen eines modifizierten Mischungsentwurfs aus vorgeprüften Kenngrößen den Startwassergehalt für die weitere Betonoptimierung abschätzen zu können, sind in systematischen Leimversuchen vertieft die Einflüsse von Kornart, Kornform und Korngrößenverteilung des Mehlkorns auf den optimalen Wassergehalt herauszuarbeiten.
- Der benötigte Verarbeitbarkeitszeitraum wird durch die Art der Verwendung und die Umgebungsbedingungen bestimmt. Der Verarbeitbarkeitszeitraum ergibt sich aus den Wechselwirkungen des Mehlkorns mit dem Fließmittel. Daher ist das Zusammenwirken zwischen Mehlkorn und Fließmittel in Leim- und Mörtelversuchen unter Berücksichtigung der Zeit und der Temperatur genauer zu analysieren. Insbesondere der beobachtete Verarbeitbarkeitsverlust in unterschiedlichen Temperaturbereichen ist zu erklären.
- Aufgrund der Vielzahl an Variationsmöglichkeiten in der Zusammensetzung selbstverdichtender Betone zeigen diese bei gleichen Verarbeitbarkeitseigenschaften oft unterschiedliche Frischbetonkenngrößen. Daher ist ein geeignetes Konzept zur allgemeinen, individuellen Bewertung der Verarbeitbarkeitseigenschaften von selbstverdichtendem Beton zu erstellen.
- Gerade bei der Verwendung von SVB kommt es darauf an, dass der Beton zum Einbauzeitpunkt alle benötigten Frischbetoneigenschaften aufweist. Dabei bereitet die Beurteilung der Sedimentation die größten Probleme, da sie in der Regel erst erkannt wird, wenn das Bauteil bereits betoniert wurde. Bislang gibt es kein geeignetes Prüfverfahren, mit dem die Stabilität des Betons als Schnelltest unmittelbar vor dem Einbau bestimmt werden kann. Um die Stabilität selbstverdichtender Betone vorauszusagen, sind durch gezielte Variation der Betonzusammensetzungen die Einflüsse auf die Sedimentation vertieft herauszuarbeiten.
- Es ist zu untersuchen, inwieweit sich selbstverdichtende Eigenschaften mit herkömmlichen, nicht speziell ausgewählten Ausgangsstoffen erzielen lassen.

Der Stand der Kenntnis und die zur Bearbeitung dieses Themas benötigten Grundlagen werden im Folgenden detailliert dargestellt.

3 Stand der Kenntnis

3.1 Selbstverdichtender Beton

3.1.1 *Eigenschaften des selbstverdichtenden Betons*

Selbstverdichtender Beton (SVB) ist ein Hochleistungsbeton, dessen besonderes Leistungsvermögen in der Frischbetoneigenschaft „Selbstverdichtung“ besteht. SVB ist so beschaffen, dass er praktisch keine Fließgrenze mehr aufweist und doch kein Sedimentieren des Grobkorns zeigt. Rheologisch entspricht SVB daher einer Newtonflüssigkeit mit hoher Viskosität, die das Gesteinskörnungsgerüst in stabiler Lage hält. Zusätzliche Verdichtungsenergie ist beim Einbau nicht mehr nötig [Gru99, Oka95, Opp99, Rei01, Rol99, Ste98, Tak98a, Tak98b, Yur98].

Das im Vergleich zu Rüttelbeton völlig andere rheologische Verhalten von SVB beruht auf einem erhöhten Mehlkorngesamt und einem auf das Mehlkorn abgestimmten Wassergehalt (damit auf einem erhöhten Leimgehalt) sowie der Verwendung hochwirksamer Fließmittel. Entscheidend für die Verwendung von SVB ist die Beherrschung der Fließfähigkeit der Suspension, das Vermeiden des Absetzens der groben Gesteinskörnung sowie die Temperatur- und Zeitabhängigkeit dieser Eigenschaften. Während beim Rüttelbeton Konsistenzschwankungen durch gezielten Rüttlereinsatz eventuell ausgeglichen werden können, entfällt diese Möglichkeit beim SVB. Durch den Eintrag von Verdichtungsenergie verliert der Leim seine Tragfähigkeit, was zu erheblicher Sedimentation führen kann. Deshalb darf sich die Verarbeitbarkeit während der vorgesehenen Verarbeitungsdauer praktisch nicht ändern.

Im Gegensatz zu konventionellen Rüttelbetonen gemäß DIN EN 206-1/DIN 1045-2 benötigen SVB einen erhöhten Mehlkorngesamt und besitzen eine Konsistenz, die über der bisher höchsten Konsistenzklasse F6 liegt. Daher darf SVB in tragenden Konstruktionen derzeit nur mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung oder mit Zustimmung im Einzelfall eingesetzt werden. Der Deutsche Ausschuss für Stahlbeton DAfStb hat eine Richtlinie erarbeitet, die die Herstellung und Verwendung von SVB regeln soll [Ril03]. Mit ihrer bauaufsichtlichen Einführung ist Anfang 2005 zu rechnen.

Selbstverdichtender Beton bietet aufgrund seiner Eigenschaften ein hohes Innovations- und Rationalisierungspotential für die Betonbauweise. Durch die sichere Anwendung dieser Technologie lässt sich das Produkt Beton weiter qualitativ verbessern, da eine häufige Fehlerquelle für schadhafte Beton, das fehlerhafte Verdichten, ausgeschaltet wird. Außerdem entfallen die gesundheitlichen Risiken wie das „Weiße-Finger-Syndrom“ durch Übertragen der Vibration des

Rüttlers auf den Körper [Bar99], Hebearbeiten in oft gebückter Haltung und Lärm sowie die hohen Anforderungen an die Kenntnis des Personals und die Beanspruchung der Schalung durch die Rüttler. Des Weiteren können verbesserte Sichtbetoneigenschaften (wenig Poren, gleichmäßige Farbgebung) durch zusätzliche Optimierung erzielt werden.

3.1.2 Rezepturenentwicklungsverfahren für selbstverdichtenden Beton

3.1.2.1 Allgemeines

Es existieren verschiedene Verfahren der Rezepturenentwicklung, bei denen es sich stets um empirische Ansätze handelt. Kategorisiert werden diese Ansätze nach der Art, dem Beton die benötigte Viskosität zu verleihen. Dabei wird zwischen Mehlkorntyp, Stabilisierertyp und Kombinationstyp unterschieden [Cle98, Ger98, Jac99, Oka95, Tak98a, Tak98b, Wal99]. Die verschiedenen Typen werden im Folgenden vorgestellt.

3.1.2.2 Mehlkorntyp

Der sogenannte Mehlkorntyp-SVB wird durch den „General Purpose Approach“ (GPA) nach Okamura beschrieben und stellt die bisher wichtigste Grundlage zur Entwicklung selbstverdichtender Betone dar, siehe Bild 3.1.1. Mit ausgewählten Anteilen verschiedener Korngruppen vom μm - bis in den cm-Bereich wird über die Eignungsprüfungsstufen Leim, Mörtel und Beton der geeignete SVB entwickelt. Erst wenn der Beton ein bestimmtes „Setzfließmaß“ in Verbindung mit einer bestimmten relativen „Trichterauslaufgeschwindigkeit“ aufweist, ist der richtige Beton gefunden [Jac99, Oka95, Pet98, Tak98a, Tak98b, Wal99]. Dieser Ansatz ist langwierig und gewährleistet nicht unbedingt die Herstellung eines selbstverdichtenden Betons. Bei diesem Ansatz wird die benötigte Viskosität durch ein entsprechend optimiertes und verflüssigtes Mehlkornhaufwerk erzielt („Powder Type“). Die zeitabhängigen Verarbeitbarkeitseigenschaften werden unter der Empfehlung C_2S -reicher und C_3A -armer Zemente dann überwiegend der Wirkungsweise des Fließmittels zugeschrieben.

Um das Blockieren des Frischbetons vor Bewehrungshindernissen beim Einbringen zu umgehen, liefert der GPA oft einen höheren Leimgehalt als eigentlich notwendig wäre [Sed99]. Einige Ansätze berücksichtigen das Blockierkriterium bei der Rezepturenentwicklung [Bui02, Pet96, Pet99, Tan95]. Durch eine Vielzahl von Versuchen wurden für verschiedene Gesteinskörnungen Referenzkurven erstellt, mit denen ein minimaler Leimgehalt für blockierungsfreies Fließen für verschiedene Sand/Kies-Verhältnisse bestimmt werden kann. Diese

Vorversuche sind sehr aufwendig und gelten nur für bestimmte Gesteinskörnungen. Zusätzlich sind Setzfließmaß-Versuche und weitere Frischbetontests erforderlich.

Weiterhin enthält die Literatur Ansätze, um aus Ausgangskomponenten wie Gesteinskörnungsart, -form und -gehalt über Packungsdichten und Fließversuche Vorhersagen für die rheologischen Größen Fließgrenze und dynamische Viskosität zu treffen [Oh99, Sed99] und sie in blockierungsfreie Bereiche einzuteilen. Diese Verfahren sind ebenfalls stark vom verwendeten Fließmittel und von den Ausgangsstoffen abhängig und liefern zum Teil widersprüchliche Ergebnisse.

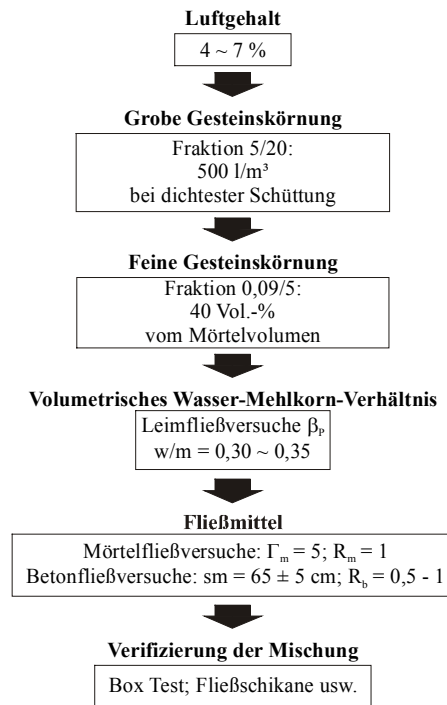


Bild 3.1.1: Mischungsentwurf nach Okamura [Naw98]

3.1.2.3 Stabilisierertyp

Das Verfahren zur Herstellung von SVB des Stabilisierertyps beruht darauf, das für selbstverdichtende Eigenschaften erforderliche Leimvolumen von rund 400 l/m³ mit Mehlkorngehalten, die z. B. noch den Regelungen der DIN EN 206-1/DIN 1045-2 entsprechen, zu erzielen und das fehlende Leimvolumen durch

erhöhte Wassergehalte aufzufüllen. Um die benötigte Tragfähigkeit dieses Leimes einzustellen, werden erhöhte Mengen an Stabilisierern eingesetzt. Dieser in der Literatur [Oka95, Tak98a, Tak98b] als „Viscosity Agent Type“ bezeichnete SVB ähnelt in der Betonzusammensetzung dem Unterwasserbeton und ist als Konstruktionsbeton praktisch nicht erprobt. Zusätzlich bestehen Bedenken, dass die organischen Stabilisierer in den benötigten Dosierungen zu hohen Porositäten im Betongefüge führen können und sich dadurch nachteilig auf wichtige Festbetoneigenschaften wie z. B. E-Modul, Schwindmaß, Kriechmaß und Frostwiderstand auswirken [Boo03, Hau01].

3.1.2.4 Kombinationstyp

Der Kombinationstyp-SVB verbindet den „Mehlkorntyp“ mit der Zugabe eines stabilisierenden Zusatzmittels. Die Mischungsrezeptur wird zum Beispiel nach dem GPA ermittelt. Die Zugabe des Stabilisierers in geringen Mengen soll die Viskosität des SVB unempfindlicher gegen Schwankungen im Mehlkornaufbau und im Wassergehalt machen, ohne die Fließfähigkeit des SVB zu beeinträchtigen [Oka95, Rol99, Shi03, Tak98a, Tak98b, Yur98]. Die Verwendung von Stabilisierern geschieht hierbei in erster Linie aus Gründen der Qualitätssicherung und der Vergleichmäßigung der Produktion. Es zeigt sich jedoch, dass die Verwendung von Stabilisierern die Selbstentlüftung des Betons beim Einbauprozess behindern und gegebenenfalls zu erhöhten Luftgehalten bzw. zu porigen Oberflächen führen kann.

3.1.3 Einflüsse auf die Verarbeitbarkeit selbstverdichtender Betone

Das Fließverhalten und die Stabilität aller Betone und insbesondere selbstverdichtender Betone wird nachweislich von der Kornform, der Kornverteilung und den chemischen Wechselwirkungen der Mehlkornfraktionen in der Suspension beeinflusst [Fan99, Fla74, Kre87, Kre88, Neh98, Pap63, Spr91, Syb93, Wes73]. Um die für die Selbstverdichtung geforderten Frischbetoneigenschaften zu erzielen, muss z. B. die Abweichung vom Zielwert des Setzfließmaßes auf rund 50 mm sowie der Trichterauslaufzeit auf rund 5 s eingestellt werden (Anhaltswerte). Schwankungen der Oberflächenfeuchte der Gesteinskörnung von im Mittel 0,5 M.-% bringen bei 1600 kg je m³ Beton 8 l mehr oder weniger Wasser mit sich. Diese Differenz kann bereits zu deutlichen Abweichungen in der oben genannten Größenordnung im Setzfließmaß aber besonders in der Trichterauslaufzeit zur Folge haben [Hib02, Kor02, Wal99, Yur98]. Die Feinheit des Mehlkorns hat ebenfalls einen erheblichen Einfluss auf das Setzfließmaß. Geringe Abweichung können eine Veränderung des Setzfließmaßes zwischen 100 bis 150 mm bewirken [Yur98]. Weiterhin kann die Temperatur einen großen Ein-

fluss auf die Wechselwirkungen zwischen Mehlkorn und Fließmittel und damit auf die Verarbeitbarkeitseigenschaften ausüben. Dies gilt besonders für Fließmittel, die der Wirkstoffgruppe der Polycarboxylatether angehören [Bud99, Naw00]. In [Bra02, Bra03] wird berichtet, dass bereits eine Erhöhung der Frischbetontemperatur um 1 °C zum Verlust der selbstverdichtenden Eigenschaften führen kann.

3.1.4 Festbetoneigenschaften selbstverdichtender Betone

Untersuchungen zu Festigkeits- und Dauerhaftigkeitseigenschaften selbstverdichtender Betone haben gezeigt, dass sie im Vergleich zu normalen Rüttelbetonen vergleichbarer Festigkeitsklassen trotz der erhöhten Mehlkorngehalte kaum Nachteile aufweisen [Bar99, Bea99, Bra01, Bra02, Gra02, Gru99, Jac99, Opp99, Pet98]. Diese Erfahrungen decken sich auch mit Ergebnissen des Autors [Kor02, Kor03, Sie02], so dass eine weiterführende Betrachtung der Festbetoneigenschaften im Rahmen dieser Arbeit nicht erfolgt.

3.1.5 Zusammenfassung

Gemessen an dem hohen Innovationspotential sind die derzeitigen Anwendungen von SVB in Deutschland kaum nennenswert. Dies liegt zum einen an dem noch nicht bauaufsichtlich eingeführten Regelwerk und zum anderen an einem empirischen Rezepturenentwicklungsverfahren, an der hohen Empfindlichkeit des Betons gegen Schwankungen um die optimale Zusammensetzung sowie an fehlenden Beurteilungskriterien für die Verarbeitbarkeitseigenschaften bei der Herstellung und Verwendung. Die Literaturquellen verdeutlichen die Empfindlichkeit des Systems Mehlkorn-Zusatzmittel-Wasser und die herausragende Bedeutung der zeitabhängigen Verarbeitbarkeitseigenschaften bei der Herstellung und Verwendung selbstverdichtender Betone. Trotz intensiver Forschungsarbeit, die etwa 1990 in Japan begann, ist noch kein Entwurfskonzept für die zielsichere Herstellung selbstverdichtender Betone vorhanden. Sie ermitteln die erforderlichen Frischbetoneigenschaften empirisch nach dem Prinzip „trial and error“. Darüber hinaus beziehen sich fast alle Rezepturenentwicklungsverfahren ausschließlich auf die Herstellung der gewünschten Verarbeitbarkeit unmittelbar nach Herstellungsende und betrachten nicht den Verlauf der Verarbeitbarkeit in Abhängigkeit von der Zeit und den Umgebungsbedingungen. Gerade vor dem Hintergrund der zielsicheren Anwendung der Technologie des selbstverdichtenden Betons muss die Verarbeitungszeit stärker in der Rezepturenentwicklung berücksichtigt werden. Die offenen Fragestellungen, die sich aus der Literaturaus-

wertung ergeben, sind im Abschnitt 2, Ziel der Arbeit, und Abschnitt 4, Vorgehensweise, enthalten.

Um das Frischbetonsystem SVB von der Herstellung bis zum Einbau zu beschreiben, zu beurteilen und zu steuern, sind erweiterte Kenntnisse über

- ☐ das Fließverhalten zementhaltiger Suspensionen,
- ☐ die Einflüsse von mehlfeinen Stoffen auf die Verarbeitbarkeit sowie
- ☐ die Einflüsse von Fließmitteln auf die Verarbeitbarkeit

erforderlich. Die zugehörigen Grundlagen werden im Folgenden vorgestellt.

3.2 Fließverhalten zementhaltiger Suspensionen

3.2.1 Rheologische Grundlagen und Modelle

3.2.1.1 Allgemeines

Flüssigkeiten und plastische Körper lassen sich physikalisch mit den Gesetzen der Rheologie beschreiben. Die Rheologie ist die Wissenschaft vom Verformungsverhalten der Stoffe, die sich mit den Wechselwirkungen zwischen Scherspannung und Scherdehnung und ihrer zeitlichen Veränderung befasst. Das Verformungsverhalten kann in einem laminaren, stationären Fließvorgang untersucht werden. In Abhängigkeit einer von außen aufgetragenen Belastung, meist in Form eines Geschwindigkeitsgefälles, setzt der Stoff seiner Verformung einen Widerstand entgegen. Aus dem zugehörigen Verformungswiderstand lässt sich das Fließgesetz des Stoffes bestimmen. Diese Wechselwirkung ist in einer Fließkurve darstellbar. Zur Ermittlung von Fließkurven können Flüssigkeiten und plastische Stoffe in Viskosimetern untersucht werden. Zur Ermittlung der Fließeigenschaften zementhaltiger Suspensionen wie Zementleim, Mörtel und Beton wurden eine Vielzahl von Rotationsviskosimetern oder Rheometern entwickelt. Das Grundprinzip aller Rotationsviskosimeter ist die Erzeugung eines Fließvorgangs innerhalb des zu untersuchenden Stoffes und das Messen der durch diesen Stoff übertragenen Scherspannung bei verschiedenen Schergeschwindigkeiten.

3.2.1.2 Newtonsche Flüssigkeiten

Verhält sich eine Flüssigkeit linear-reinviskos, bezeichnet man sie als newtonsche Flüssigkeit. Dabei ist die Scherspannung τ , die man benötigt, um in der

Flüssigkeit ein Schergefälle $\dot{\gamma}$ zu erzeugen, proportional zur Größe des Gefälles und kann entsprechend der Gleichung

$$\tau = \dot{\gamma} \eta \quad \text{mit } [\eta] = \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \text{ s} \quad (1)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt}$$

beschrieben werden. Die Fließkurve, die das aufgebrachte Geschwindigkeitsgefälle gegen den gemessenen Verformungswiderstand darstellt, verläuft linear und durch den Koordinatenursprung, siehe Bild 3.2.1. Der Proportionalitätsfaktor zwischen Scherrate und Scherspannung ist die Viskosität η der Flüssigkeit und entspricht im Diagramm dem Tangens α der Fließkurve. Wasser, Glycerin und Öle sind z. B. newtonsche Flüssigkeiten. Zu beachten ist, dass die Viskosität einer Flüssigkeit bzw. eines Stoffes immer temperaturabhängig ist.

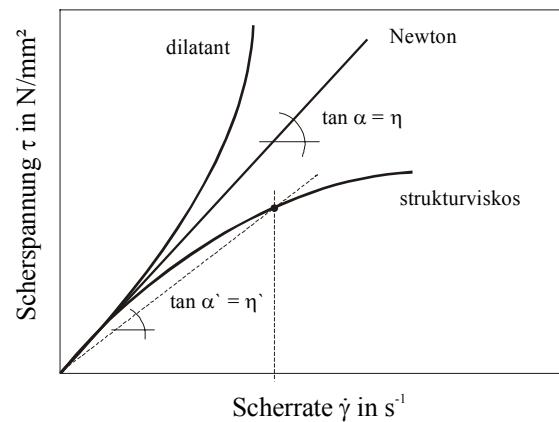


Bild 3.2.1: Schematische Darstellung von Fließkurven für newtonsche Flüssigkeiten

Das Fließverhalten vieler Flüssigkeiten weicht jedoch vom linear-reinviskosen Fließen ab. Wird eine Flüssigkeit bei steigender Beanspruchung dünnflüssiger, so verhält sie sich strukturviskos. Eine Flüssigkeit, die mit zunehmender Scherspannung dickflüssiger wird, verhält sich dilatant. Für diese Flüssigkeitsarten kann nicht eine Viskosität als physikalische Stoffkonstante im newtonschen Sinne definiert werden. Daher wurde die Größe einer scheinbaren oder dynamischen Viskosität $\eta' = \tan \alpha'$ eingeführt, deren Größe von der Scherrate abhängt [Wes73], siehe Bild 3.2.1.

Darüber hinaus sind reversible und nicht-reversible Änderungen des Fließverhaltens von Flüssigkeiten zu beachten. Thixotropes Verhalten liegt vor, wenn die Flüssigkeit bei konstanter mechanischer Belastung niedrigviskoser und nach Ende der Belastung wieder höherviskoser wird. Umgekehrt zeigt eine Flüssigkeit rheopexes Verhalten, wenn die Viskosität durch konstante mechanische Belastung steigt und nach Abnahme der Belastung wieder abnimmt. Diese Eigenschaften werden im Allgemeinen durch die Art und Dauer der Belastung beeinflusst. Grafisch können Thixotropie und Rheopexie in einer Fließkurve, die sowohl den Anstieg der Belastung als auch die Abnahme beinhaltet, durch die Fläche zwischen Belastungs- und Entlastungsast dargestellt werden. Bild 3.2.2 zeigt schematisch das thixotrope Verhalten einer Flüssigkeit in Abhängigkeit von der Belastungsdauer.

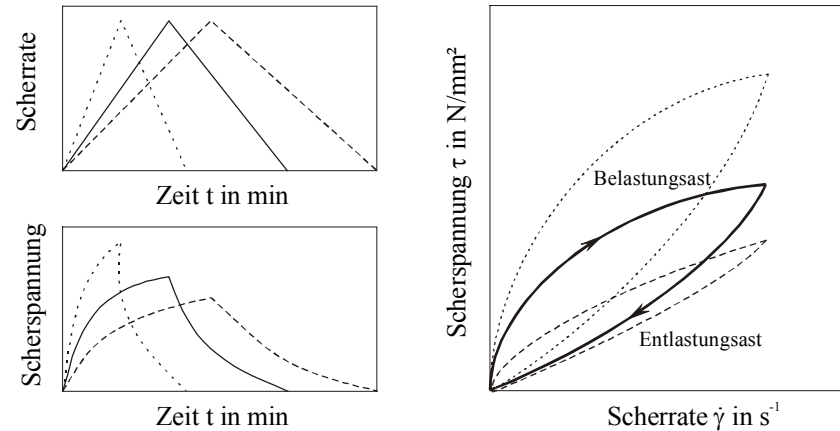


Bild 3.2.2: Schematische Darstellung thixotropen Verhaltens in Abhängigkeit von der Belastungsdauer [Wal02]

3.2.1.3 Plastische Stoffe

Ein deformierbarer Stoff wird als plastisch bezeichnet, wenn er sich in einem unteren Scherspannungsbereich wie ein elastischer oder viskoelastischer Festkörper, in einem oberen Scherspannungsbereich dagegen wie eine Flüssigkeit verhält. Die Scherspannung, bei der dieser Übergang stattfindet, nennt man Fließgrenze. Verhält sich ein plastischer Stoff, nachdem er die Fließgrenze überwunden hat, wie eine newtonsche Flüssigkeit, so spricht man von einem Bingham-Körper, siehe Bild 3.2.3. Sein Fließverhalten kann durch die Gleichung

$$\tau = \tau_f + \dot{\gamma} \eta \quad \text{mit } [\eta] = \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \text{ s} \quad (2)$$

$$[\tau, \tau_f] = \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

beschrieben werden. τ_f gibt den Wert der Fließgrenze an. Entsprechend Abschnitt 3.2.1.2 werden plastische Stoffe, die kein lineares Fließverhalten aufweisen, als strukturviskoser Bingham-Körper oder als dilatanter Bingham-Körper bezeichnet. Ebenso können reversible oder nicht-reversible Änderungen des Fließverhaltens infolge konstanter mechanischer Belastung sowie infolge chemischer Reaktionen, wie z. B. der Hydratation bei zementgebundenen Systemen, auftreten.

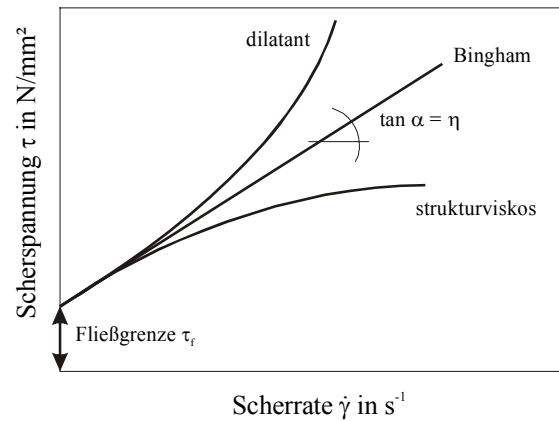


Bild 3.2.3: Schematische Darstellung von Fließkurven für Bingham-Körper

3.2.1.4 Rheologische Modelle für Zementleim

Neben dem in Abschnitt 3.2.1.3 vorgestellten linearen Bingham-Modell existieren eine Reihe anderer physikalischer Modelle zur Beschreibung des Fließverhaltens zementhaltiger Suspensionen und zur Auswertung von Fließkurven.

Das Fließverhalten von Zementleim weicht vom linearen Fließen ab und zeigt in der Regel thixotropes Verhalten in Form einer Hysterese-Kurve mit einem eher strukturviskosen Belastungsast und einem meist dilatanten Entlastungsast. Da sowohl infolge der beginnenden Hydratation, insbesondere der Aluminatreaktionen und der Ettringitbildung, siehe Abschnitt 3.3.4, als auch durch die Scherbelastung im Rheometer sich die Struktur des Zementleimes verändert, ist der

Vorgang im Allgemeinen nicht reversibel. Der Abfall des Scherwiderstandes bei konstanter mechanischer Belastung infolge des Aufbrechens der agglomerierten Zementpartikel und deren Ausrichtung in Scherrichtung, der in einem temporären Gleichgewichtszustand endet bevor sich durch die Hydratation erneut eine Struktur bildet, wird bei zementhaltigen Suspensionen daher auch als Strukturbruch bezeichnet [Tat83b]. Der Grad des Strukturbruchs hängt jedoch im hohen Maße von der „Vorgeschichte“ der Suspension, der Agglomerationsrate sowie von der Messgeometrie und dem Messprofil ab [Kec99, Tat83b].

Die Bestimmung der Fließgrenze und der plastischen Viskosität kann am Belastungsast, d. h. bei steigender Scherbelastung, und am Entlastungsast, bei abnehmender Scherbelastung, erfolgen. Analog den Scherversuchen an bindigen Böden im Grundbau eignen sich die Entlastungsäste der Fließkurven wegen ihrer besseren Reproduzierbarkeit eher als die Belastungsäste. Die meisten mathematischen Modelle zur Beschreibung der Fließkurven von Zementleimen stellen nichtlineare Ansätze unter Verwendung weiterer Konstanten dar, die wiederum empirisch ermittelt oder abgeschätzt werden müssen und somit eine physikalische Deutung nur näherungsweise ermöglichen. Als nichtlinearer Ansatz sei an dieser Stelle das Fließgesetz von Herschel-Bulkley erwähnt, das auf dem Bingham-Modell aufbaut und durch die folgende Gleichung beschrieben wird.

$$\tau = \tau_f + a \dot{\gamma}^b \quad (3)$$

$b < 1$: strukturviskos
 $b = 1$: Bingham
 $b > 1$: dilatant
 a = Konstante

Eine ausführliche Zusammenstellung mathematischer Modelle zur Beschreibung von Fließkurven ist in [Ban03] und [Kec99] enthalten. In [Atz85] wurden rheologische Eigenschaften von Zementleimen mit einem coaxialen Zylinder-viskosimeter gemessen. Die rheologischen Kenngrößen Fließgrenze und plastische Viskosität wurden dann mit sechs verschiedenen Modellen berechnet und gegenübergestellt. Diese Untersuchungen ergaben, dass alle Modelle zufriedenstellende Ergebnisse lieferten. Einige Modelle besaßen jedoch nur in einem begrenzten Scherspannungsbereich Gültigkeit. In [Ban03] wird darauf hingewiesen, dass der sehr weite Bereich der in der Literatur angegebenen Werte für die Fließgrenze und die plastische Viskosität von Zementleimen über die Variation der Eigenschaften verschiedener Zemente hinausgeht. Daraus wird gefolgert, dass sowohl die Vorgehensweise der unterschiedlichen Forscher als auch die

Differenzen in der Messtechnik einen größeren Einfluss auf das Ergebnis ausüben, als bisher angenommen wurde.

3.2.1.5 Rheologische Modelle für Mörtel und Beton

Mörtel und Betone sind Verbundwerkstoffe, die modellhaft gesehen aus der Feststoffphase Gesteinskörnung und der Flüssigphase Leim bestehen. Dabei bilden in der Regel die mehlfeinen Stoffe mit einem Korndurchmesser kleiner 125 µm zusammen mit dem Wasser und gegebenenfalls Zusatzmitteln den Leim. Durch die „Verdünnung“ des Zementleims mit Gesteinskörnung nimmt mit zunehmendem Maße der Einfluss der leimspezifischen Unterschiede auf das Fließverhalten ab. So konnte Tattersall zeigen, dass zwei Zementleime mit deutlich unterschiedlichen Fließeigenschaften in daraus hergestellten Betonen das gleiche Fließverhalten besaßen [Tat83b]. Andererseits beginnen die Eigenschaften der Gesteinskörnung wie Sieblinie, Gehalt und Kornform einen großen Einfluss auf das Fließverhalten auszuüben. Mit steigendem Gehalt an Gesteinskörnung vergrößert sich die Fließgrenze, da das Korngerüst zunehmend in der Lage ist, aufgebrachte Scherspannungen aufzunehmen. So spielt auch die Sieblinie und die Kornform eine entscheidende Rolle, da z. B. Ausfallkörnungen und gebrochene Kornformen das Verzahnungsvermögen erhöhen. Im gleichen Maße wie die Fließgrenze wird auch die Viskosität durch die Gesteinskörnung beeinflusst. So besitzen z. B. Mörtel und Betone mit gebrochenkörniger Gesteinskörnung im Vergleich zu runder Gesteinskörnung durch die größere innere Oberfläche eine höhere Viskosität [Tat83b].

Obwohl die Messtechnik bei der Bestimmung rheometrischer Kenngrößen an Mörteln und Betonen physikalisch gesehen größere Kompromisse einfordert, besitzt das Bingham-Modell jedoch auch hier näherungsweise Gültigkeit. So lässt sich das Fließverhalten von Mörtel und Beton im Vergleich zu Zementleim genauer und einfacher linear beschreiben. Der Hauptgrund für die einfachere rheometrische Beschreibung von Mörtel und Beton und die zunehmende Gültigkeit des Bingham-Modells liegt darin begründet, dass das thixotrope Verhalten im Vergleich zu Zementleim weniger ausgeprägt ist. Durch die verstärkte innere Scherung des Zementleims während des Mischens erfolgt mit zunehmendem Gesteinskörnungsgehalt ein fast kompletter Strukturbruch, der dann in der eigentlichen rheometrischen Messung nicht mehr stattfindet [Ban03].

3.2.2 Prüfverfahren zur rheologischen Beschreibung

3.2.2.1 Rheologische Prüfparameter

Wie in Abschnitt 3.2.1 dargestellt, wird das Fließverhalten von Flüssigkeiten bzw. plastischen Stoffen rheologisch durch die zwei Kenngrößen Fließgrenze und Viskosität beschrieben. Da es für Zementleim, Mörtel und Beton in der Regel nicht gelingt, die physikalischen Randbedingungen während der Messung zur Erzielung rheologischer Werte in absoluten Größen einzuhalten, bezeichnet man diese Prüfverfahren und die abgeleiteten Kennwerte als rheometrisch.

Zur Ermittlung der Fließgrenze und Viskosität muss das Verformungsverhalten des Zementleimes, Mörtels oder Betons mindestens unter zwei Belastungsstufen im Rheometer untersucht werden. Die entsprechenden Prüfverfahren werden auch Zwei-Punkt-Versuche genannt, da während eines Versuchs durch Variation der Belastungsgeschwindigkeit beide Kennwerte ermittelt werden können [Tat73, Tat83a, Tat83b]. Daneben besteht die Möglichkeit, durch die Wahl zweier Konsistenzprüfverfahren das Fließverhalten zu beschreiben. Im folgenden werden die wichtigsten Prüfverfahren zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Zementleim, Mörtel und Beton sowie ihr Gültigkeitsbereich beschrieben.

3.2.2.2 Rheometrische Prüfverfahren für Zementleim und Mörtel

Zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften von Zement- bzw. Mehlkornleimen und Feinmörteln kann im einfachsten Fall das Couette-Viskosimeter verwendet werden. Das Couette-Viskosimeter besteht aus zwei konzentrisch angeordneten (koaxialen) Zylindern, in deren gemeinsamen Ringraum sich die zu untersuchende Flüssigkeit bzw. Suspension befindet. Der äußere Zylinder wird mit unterschiedlich hoher Umdrehungsgeschwindigkeit angetrieben. Am inneren Zylinder wird das von der Flüssigkeit bzw. Suspension übertragene Drehmoment gemessen. Um reproduzierbare, physikalische Werte zu erhalten, muss die erzeugte Strömung laminar und stationär sowie das Geschwindigkeitsgefälle und die Schubspannung im gesamten Strömungsbereich konstant sein. Des Weiteren muss das Messergebnis in absoluten Einheiten ausdrückbar sein. Werden die gemessenen Scherspannungen über dem zugehörigen Geschwindigkeitsgefälle in einem Diagramm aufgetragen, erhält man verschiedene Wertepaare, die miteinander verbunden die Fließkurve der betreffenden Flüssigkeit ergeben. Aus dieser Fließkurve können dann die rheologischen Kennwerte plastische Viskosität und Fließgrenze berechnet werden. Mit dem Couette-Viskosimeter können nur Fließkurven von Zementleim und Feinmörtel aufgenommen werden. Um die als Grundvoraussetzung angegebene laminare und stationäre Strömung im Viskosimeter zu erreichen, muss der Spalt zwischen den

beiden Zylindern möglichst klein, also das Verhältnis des Innen- zum Außendurchmessers möglichst nahe an 1 sein. Die Weite des Messspalts bestimmt somit das Größtkorn [Kai69]. In einem speziellen Couette-Viskosimeter konnten sogar Untersuchungen an Mörteln mit einem Größtkorn von 2 mm bei einer Spaltweite von 20 mm erfolgreich durchgeführt werden [Ban91]. Je nach Art der Suspension und Prüfgeometrie üben jedoch Sedimentationsvorgänge, Wandgleiteffekte und Scherzonenbildung einen störenden Effekt auf das Messergebnis aus [Fla73, Kai74, Teu82].

Um die Einflüsse der Sedimentation und der Wandgleitung, die bei Untersuchungen an Zementleimen und Mörteln einen großen Einfluss haben, zu unterdrücken, wurden Rheometer wie der Visco-Corder und der Viskomat entwickelt [Ban92, Teu82, Wol85]. Die zu untersuchende Suspension wird in einem definierten Volumen in einen Probehälter gegeben. Nach dem Start der Messung wird ein Messpaddel in den Probehälter eingetaucht, der gemäß des gewählten Messprofils zu rotieren beginnt. Es wird das Widerstandsmoment gemessen, das bei der jeweiligen Belastungsgeschwindigkeit durch die Suspension auf das Messpaddel übertragen wird. Das Messpaddel ist so geformt, dass ein Entmischen des Zementleims bzw. Mörtels verhindert wird. Durch das Messpaddel wird die Suspension dreiachsigal geschert. Die Strömung ist noch laminar, d. h. es bilden sich keine Verwirbelungen im Prüfgut. Es können jedoch keine genauen Flächen angegeben werden, in denen eine Kraftübertragung stattfindet und die Probe geschert wird. Somit ist eine der Bedingungen für die Ermittlung reiner physikalischer Größen, die quantitative Scherspannungsermittlung, nicht mehr erfüllt [Gre04]. Daher können die Messwerte nicht rheologisch in absoluten Größen ausgedrückt werden, sondern werden rheometrisch in der Form

$$T = g + h N \quad \text{mit } T, g \text{ in Nmm} \quad (4)$$

$$h \text{ in Nmm s}$$

$$N \text{ in s}^{-1}$$

dargestellt [Ban92, Tat83a, Tat83b]. T ist das durch die Suspension auf das Paddel übertragene Drehmoment und N die gewählte Belastungsgeschwindigkeit. Die das Fließverhalten beschreibenden Parameter g und h entsprechen prinzipiell den rheologischen Kennwerten Fließgrenze τ_f und plastische Viskosität η , siehe Bild 3.2.4. Eine Kalibrierung in physikalische Grundeinheiten kann durch Vergleichsmessungen an Flüssigkeiten mit bekannten rheologischen Flüssigkeiten geschehen [Ban92]. Dies gestaltet sich jedoch recht schwierig, da

infolge der Messpaddelgeometrie zunehmend Luft in die Kalibrierflüssigkeit eingerührt wird und sich dadurch die Viskosität der Prüfflüssigkeit verändert. Zudem lässt sich eine Kalibrierung mit Prüfölen nur für newtonsche Flüssigkeiten erzielen und nicht für zementhaltige Suspensionen, die eine Fließgrenze aufweisen [Gre04]. Die rheometrischen Messwerte „Fließgrenze“ g und „plastische Viskosität“ h eignen sich jedoch gut, um die Fließeigenschaften von Zementleimen und Mörteln qualitativ untereinander zu vergleichen.

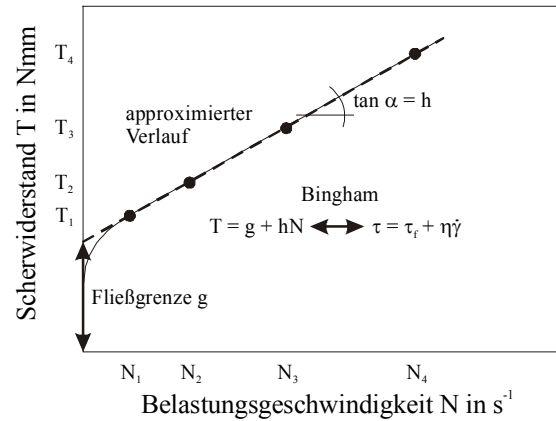


Bild 3.2.4: Ermittlung von Fließkurven mit den rheometrischen Kennwerten g und h

3.2.2.3 Rheometrische Prüfverfahren für Beton

Ebenso wie für die rheologischen bzw. rheometrischen Verfahren zur Bestimmung der Fließeigenschaften von Zementleimen und Mörteln gibt es auch einige Rheometer für Beton. Im Folgenden werden Verfahren dargestellt, die über Zwei- bzw. Mehrpunktmessungen ein Abschätzen rheologischer Kennwerte von Betonen ermöglichen. Die Mehrpunktmessgeräte arbeiten prinzipiell wie die unter 3.2.2.2 vorgestellten Geräte.

Tattersall entwickelte den MK-II-Apparat, um in einem einfachen Versuch die Fließgrenze und die plastische Viskosität von Frischbeton abschätzen zu können [Tat83a, Tat83b]. Dieses Gerät arbeitet nach dem Mischer-Prinzip und liefert für Betone mittlerer und hoher Konsistenz gute Ergebnisse. Ein Rührer in Form einer unterbrochenen Förderschnecke wird in den Beton eingetaucht, der sich in einem zylindrischen Topf befindet. Der Rührer wird durch einen Elektromotor bewegt und das aufgebrachte Drehmoment ermittelt. Für Betone mit niedrigeren Konsistenzen ist diese Anordnung nicht geeignet. Zur Beurteilung des Fließverhaltens von Betonen mit niedrigen Konsistenzen wurde der MK-II-Apparat von

Tattersall modifiziert [Tat91]. Die Hauptveränderung bestand in einem H-förmigen Rührer, der in einer Planetenbewegung den Beton durchfährt. Um zu vermeiden, dass sich während des Versuchs durch diese Bewegung eine bleibende Furche im Frischbeton ausbildet, wurde eine Übersetzung gewählt, die, auf die Antriebswelle bezogen, keine vollständige Umdrehung ausführt. Dadurch kehrt der H-Rührer nie in seine vorherige Position zurück. Es wird jedoch eine größere Betonprobe benötigt, die einen größeren Rührtopf erfordert. Der Tattersall-Apparat ist ständig weiterentwickelt und verbessert worden, meistens in den Bereichen Antrieb, Steuerung, Aufzeichnung und Handhabung [Dom99]. Die Auswertung der mit dem MK-II-Gerät ermittelten Daten ergibt in guter Näherung wiederum eine Gerade der Form $T = g + hN$.

Das von Wallevik und Gjrv entwickelte BML-Viskosimeter ist ein koaxiales Zylinderviskosimeter nach dem Couette-Prinzip [Wal90]. Um den feststehenden inneren Zylinder mit einem Durchmesser von 300 mm rotiert ein äußerer Zylinder mit einem Durchmesser von 400 mm, so dass sich ein Spalt von 50 mm ergibt. Mit diesem Rotationsviskosimeter wurden hochfeste Betone mit einem Größtkorn von 8 mm auf ihr rheologisches Verhalten hin untersucht. Damit ist die Spaltweite mehr als fünfmal so groß wie das verwendete Größtkorn. Mit diesem Verhältnis von Spaltweite zu Größtkorn und mit zusätzlich profilierten Innenflächen ist der Wandgleiteffekt vernachlässigbar [Hu95]. Eine niedrige Rotationsgeschwindigkeit bis 0,6 U/s sorgt für laminares Fließen während des Versuchs. Weiterentwicklungen und Modifikationen an dem Rheometer ermöglichen in Abhängigkeit des Größtkorns die Auswahl verschiedener Messsysteme mit unterschiedlichen Zylindergeometrien [Ban01, Wal03] und lassen Messungen an Betonen mit grrem Größtkorn zu. Mit diesem Rheometer lassen sich die besten Ergebnisse bei der Prüfung plastischer und fließfähiger Betone erzielen. Die Ergebnisse werden in der Form $T = g + hN$ ausgegeben und können auch durch eine entsprechende Kalibrierung an physikalische Größen angenähert werden.

Ein weiteres Rheometer für Beton ist das BTRHEOM [Hu96, Lar97]. Es ist ein Parallelplatten-Rheometer und wurde am LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris) entwickelt. Eine ringförmige Betonprobe mit einer Höhe von 240 mm und einem Durchmesser von 270 mm wird um ihre vertikale Achse geschert. Das Volumen der Probe beträgt 7 l, wobei sich ca. 6 l in der Scherzone befinden. Während die untere Platte feststeht, rotiert die obere Platte um die Vertikalachse. Beide Platten weisen auf der Innenseite speichenfrmige Einsätze auf, mit denen Gleiteffekte am Boden vermieden werden und die einen guten Schereffekt sicherstellen. Dieses Gerät eignet sich zur Untersuchung von Betonen mit einem Slumpmaß über 100 mm. ber die Drehmoment-

Drehgeschwindigkeit-Beziehung können die physikalischen Größen Fließgrenze und plastische Viskosität abgeschätzt werden [Lar97].

3.2.2.4 Rheologische Ersatzkenngrößen – Konsistenz von Beton

Die Verarbeitbarkeit ist für die Baustelle eine der wichtigsten Betoneigenschaften [Bon84]. Sie wird sowohl von den definierbaren Größen Fließgrenze und Viskosität als auch von Eigenschaften wie Verdichtungswilligkeit, Sedimentationsneigung oder Zusammenhaltevermögen bestimmt [Thi02]. Um die Verarbeitbarkeit von Frischbeton unter baupraktischen Gesichtspunkten zu beurteilen, sind über 50 Prüfverfahren entwickelt worden [Wes93], von denen DIN EN 206-1/DIN 1045-2 vier Prüfverfahren (Setzmaß, Setzzeit, Verdichtungsmaß und Ausbreitmaß) vorgibt. Die Geräte und die Durchführung dieser vier Prüfungen werden durch DIN EN 12350 geregelt. Da die Verarbeitbarkeit des Betons durch keines der Prüfverfahren hinreichend ermittelt werden kann, wurde der Begriff „Konsistenz“ eingeführt, der gemäß Definition an das entsprechende Prüfverfahren gebunden ist [Wie83]. Bei allen Konsistenzprüfungen wird in der Regel die Verformung des Frischbetons bzw. der Grad der Verdichtung unter einer definierten Belastung ermittelt. Je nach Aufbau des Versuchs werden bestimmte Frischbetoneigenschaften mehr oder weniger hervorgehoben. So muss das Prüfverfahren im Vorfeld auf die geplante, zu untersuchende Verarbeitbarkeit abgestimmt werden, da kein einzelnes Konsistenzprüfverfahren den gesamten Frischbetonbereich von erdfeucht bis sehr fließfähig abdeckt. Darüber hinaus sind die Ergebnisse der einzelnen Konsistenzprüfungen in nur sehr begrenztem Maße untereinander vergleichbar [Bon84]. Das Messergebnis ist oft von einer Vielzahl von geräte- und versuchsbedingten Einflüssen abhängig, die zu einer starken Streuung der Ergebnisse eines einzelnen Prüfverfahrens führen können [Bon84, Gru84, Wie83]. Bei sachgemäßer Durchführung der Prüfung jedoch kann z. B. mit dem Ausbreitmaßversuch eine recht hohe Reproduzierbarkeit des Messergebnisses mit einer Standardabweichung von rund 2 cm erzielt werden [Gru84]. Dies ist umso wichtiger, da die Konsistenzprüfung insbesondere bei der Verwendung von Transportbeton auch die Übergabe des Betons auf der Baustelle regelt und den Verantwortungsbereich zwischen Hersteller und Verwender abgrenzt.

Konsistenzprüfverfahren liefern unter definierten Versuchsbedingungen einen Kennwert in Form einer rheologischen Ersatzkenngröße. Daher werden diese Prüfungen auch 1-Punkt-Versuche genannt. Dies bedeutet aber auch, dass zwei Betone mit dem gleichen Ausbreit- oder Slumpmaß nicht unbedingt die gleiche Verarbeitbarkeit aufweisen [Tat83a, Tat83b]. Ein gleiches Ausbreit- oder

Slumpmaß sagt nur aus, dass sich zwei Betone unter der durch das jeweilige Verfahren eingebrachten Energie gleich verformen. Daraus kann nicht gefolgert werden, dass beide Betone auch die gleiche Fließgrenze und Viskosität besitzen, da sich ihre Fließkurven lediglich in einem Punkt treffen. Dennoch bieten die herkömmlichen Konsistenzprüfverfahren die Möglichkeit, mit einem relativ geringen Aufwand maßgebende Verarbeitbarkeitseigenschaften unter den Bedingungen der Baustelle ausreichend zu kennzeichnen, insbesondere da es sich in der Regel um eine kontinuierliche Kontroll- bzw. Annahmeprüfung eines Betons handelt. So sind Abweichungen von der geforderten Zusammensetzung und besonders vom geplanten Wassergehalt gut nachweisbar.

Zur besseren Beschreibung der Verarbeitbarkeit ist es in vielen Fällen daher zweckmäßig und bei SVB unerlässlich, während der Eignungsprüfungen ein zweites 1-Punkt-Prüfverfahren heranzuziehen, zumal die unterschiedlichen Konsistenzprüfungen teils mehr die Fließgrenze bewerten und teils eher die Viskosität beschreiben. Zur Beurteilung der Fließgrenze des Betons und damit der Energie, die benötigt wird, um den Beton zum Fließen zu bringen, eignen sich das Ausbreitmaß bzw. das Setzfließmaß, siehe 6.4.3.1. Mit diesen beiden Versuchen können ferner das Zusammenhaltevermögen und die Entmischungsneigung des Betons durch Begutachtung des gebildeten Ausbreitkuchens bewertet werden. Verdichtungsversuche (mit Messung der benötigten Verdichtungszeit) sowie Trichterausfließversuche, siehe 6.4.3.2, oder die Messung der Fließzeit des Betons während der Setzfließmaßprüfung bei SVB eignen sich, um die Viskosität des Betons zu bewerten. Sie geben Aufschluss über die Stabilität der Mischung und über die Verdichtungswilligkeit. Ein großer Vorteil der Setzfließmaß- und Trichterprüfung für SVB besteht darin, dass sie nur unter Einfluss der Schwerkraft und ohne zusätzlich aufzubringende Verdichtungsenergie durchgeführt werden. Somit entfällt eine große Fehlerquelle bei der Ermittlung der Verarbeitbarkeitseigenschaften.

3.2.3 Schlussfolgerungen

Die Ermittlung rheologischer Kenngrößen und die vollständige Beschreibung der Fließeigenschaften zementhaltiger Suspensionen ist aufgrund der umfangreichen Einflussgrößen auf das Messergebnis problematisch. In Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Suspension sowie von der gewählten Messgeometrie gelingt es mehr oder weniger, die geforderten Randbedingungen für eine aussagekräftige und reproduzierbare Messung einzuhalten. Mit fortschreitender Feststoffkonzentration, breiter werdender Kornverteilung vom μm - bis in den cm -Bereich und steigender Reaktivität des Mehlkorns in der Suspension wird

die Bestimmung durch Wandgleiteffekte, Scherfugenbildung und thixotropes Verhalten zunehmend mit Fehlern behaftet. Ebenfalls hat die „Vorgeschichte“ der Suspension bis zur Prüfung einen sehr großen Einfluss auf das Messergebnis. Hier sind vor allem die Art des Mischers, die Mischdauer und –intensität zu nennen. Ein Vergleichsversuch zwischen verschiedenen Betonrheometern ergab, dass alle getesteten Geräte unterschiedliche Werte für die Fließgrenze und für die plastische Viskosität ausgaben. Jedoch wurden die Kenngrößen der unterschiedlichen Testbetone von allen Rheometern in der gleichen Reihenfolge ermittelt [Ban01].

Auch wenn sich mit den vorgestellten rheometrischen Prüfungen keine Werte im streng physikalischen Sinn ermitteln lassen, eignen sie sich, um Betone hinsichtlich ihres Verformungsverhalten über das normale Maß hinaus zu vergleichen und zu charakterisieren. Die vorhandenen Leim-, Mörtel- und Betonrheometer können dazu benutzt werden, Frischbetoneigenschaften gezielt zu erfassen und zu steuern. Letztendlich sind es jedoch Laborgeräte, die für die Verwendung als Prüfgerät auf der Baustelle unpraktikabel und zu empfindlich sind. Ebenso ist die Ermittlung genauest angepasster Fließkurven und die Vorhersage von Viskositätsmaßen für die kontinuierliche Betonproduktion nicht unbedingt zielführend, da die normale Streuung der Betonausgangsstoffe und die Mischanlagentechnik diese Optimierung nicht zulässt.

Die herkömmlichen Konsistenzprüfverfahren bieten dagegen die Möglichkeit, mit einem relativ geringen Aufwand entscheidende Verarbeitbarkeitseigenschaften ausreichend zu kennzeichnen. Für die Ermittlung und Beschreibung der Verarbeitbarkeitseigenschaften von Hochleistungsbetonen und besonders für den selbstverdichtenden Beton ist es daher angebracht und gerechtfertigt, zwei Einpunkt-Messverfahren wie das Setzfließmaß und die Trichterauslaufzeit zu verwenden, die teils mehr die Fließgrenze und teils eher die Viskosität bestimmen.

3.3 Einfluss von mehlfeinen Stoffen auf die Verarbeitbarkeit

3.3.1 Allgemeines

Die Verarbeitbarkeit eines Mörtels oder Betons und insbesondere eines selbstverdichtenden Betons wird im starken Maße durch die Zusammensetzung des Leimes und durch den Leimgehalt bestimmt. Definitionsgemäß setzt sich der Leim aus den Anteilen des Kornhaufwerks mit einem Durchmesser kleiner 125 μm , dem sogenannten Mehlkorn, sowie dem Wasser und gegebenenfalls Betonzusatzmitteln zusammen [Kre85b, Kre87]. Das Mehlkorn beeinflusst die Verar-

beitbarkeit infolge seiner granulometrischen Erscheinungsform und seiner chemisch-mineralogischen Wirkungsweise.

Maßgeblich wird die Verarbeitbarkeit vom verwendeten Zement, vom Zementgehalt und vom Wassercementwert beeinflusst. Die Wirkung von Zusatzstoffen auf die Verarbeitbarkeit von Leimen, Mörteln und Betonen beruht bei additiver Zugabe zum einen auf der Vergrößerung des Leimvolumens und zum anderen auf der Verminderung der Wasserfilmdicke um die Feststoffpartikel. Dies führt zu einer Erhöhung des Wasserrückhaltevermögens aber auch zur Verstärkung des Anstehens durch zusätzliche Reaktionskeime [Gut90, Kre87]. Wird der Zement dagegen anteilig mengenmäßig gegen Zusatzstoffe ausgetauscht, ergibt sich ebenfalls eine Erhöhung des Leimvolumens durch die in der Regel geringere Dichte des Zusatzstoffs. Zusätzlich führt ein Austausch zu einer Verringerung der Menge an Hydratationsprodukten, wodurch über einen längeren Zeitraum mehr freies Wasser für die Verarbeitbarkeit zur Verfügung steht. Um eine ausreichende Verarbeitbarkeit zu erzielen, wird ein Mindestleimvolumen von rund 250 l/m^3 benötigt [Thi97].

Im Folgenden werden die Einflüsse der mehlfeinen Stoffe auf die Verarbeitbarkeit getrennt nach

- ☐ granulometrischen Grundlagen,
- ☐ Einfluss des Hohlraumgehalts auf den Mindestwasseranspruch von Mehlkornhaufwerken und auf die Verarbeitbarkeit sowie
- ☐ Einfluss der Zementhydratation auf die Frischbetoneigenschaften

dargestellt.

3.3.2 *Granulometrische Grundlagen*

Die Granulometrie beurteilt die physikalischen Eigenschaften eines Korngemenges. Sie gibt Auskunft über Kornform, Korngrößenverteilung und über volumetrische Eigenschaften eines Haufwerks. Mehlfeine Stoffe lassen sich granulometrisch in verschiedene Gruppen einteilen. Das einzelne Korn kann nach der Kornform (plattig oder rund), der Kornoberfläche (glatt oder rau), der Korngröße und der Korndichte beurteilt werden. Das Kornhaufwerk lässt sich durch die Korngrößenverteilung, die spezifische Oberfläche und den Hohlraumgehalt kennzeichnen.

Um gemessene Korngrößenverteilungen, die z. B. mit dem Laserbeugungsspektrometer ermittelt wurden, einfach zu charakterisieren, können sie an mathematische Verteilungsfunktionen angepasst werden. Mehlfeine Stoffe, die wie Zement und Kalksteinmehl in einem mechanischen Zerkleinerungsvorgang und insbesondere auf Durchlaufmühlen und konventionellen Umlaufmahlanlagen entstanden sind, lassen sich mit Hilfe der Verteilungsfunktion von Rosin, Rammler, Sperling und Bennett, der RRSB-Verteilung gemäß DIN 66145, zuverlässig beschreiben [Sch99], siehe Bild 3.3.1. Der Lageparameter x' entspricht der Korngröße bei einer Massenverteilungssumme $Q(x)$ von 63,2 M.-% und kennzeichnet die Feinheit des Kornaufwerks. Die Verteilungsbreite der Partikel wird mit dem Steigungsmaß n beschrieben, wobei sie mit kleineren Werten für n zunimmt. Der Korrelationskoeffizient r^2 gibt die Abweichung der gemessenen Kornverteilung von der RRSB-Verteilungsfunktion an.

Im Gegensatz dazu lassen sich ungebrochene mehlfeine Stoffe wie Flugaschen, die durch die Verfeuerung von Kohle im Kraftwerkskessel entstehen, besser durch die logarithmische Normalverteilung entsprechend DIN 66144 abbilden [Syb93]. Hierbei gibt der Medianwert d_{50} den Korndurchmesser bei einer Verteilungssumme von 50 % an. Die Standardabweichung s ist das Maß für die Verteilungsbreite.

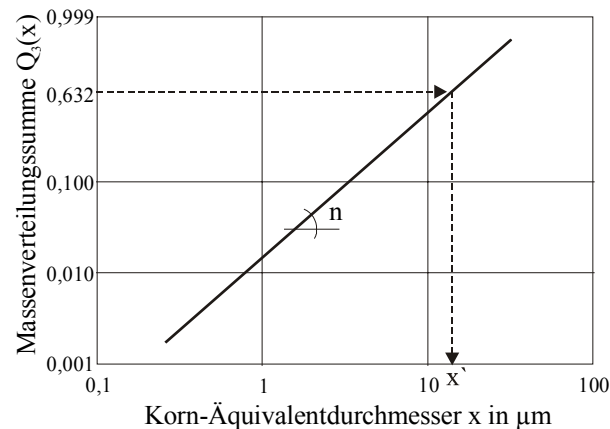


Bild 3.3.1: RRSB-Verteilung für gebrochenes Mehlkorn mit den Parametern x' und n

3.3.3 Einfluss von Hohlraumfüllung und Mindestwassergehalt auf die Verarbeitbarkeit

Entscheidend für die Verarbeitbarkeit eines Mörtels oder Betons ist die granulometrische Zusammensetzung des Mehlkorns. Besonders bei wasserarmen, mehlkornreichen Hochleistungsbetonen, wie z. B. dem hochfesten Beton oder dem selbstverdichtenden Beton, ist die granulometrische Optimierung Grundvoraussetzung für die geforderte Eigenschaft.

Für Kornhaufwerke gilt, dass der mittlere Porendurchmesser rund 10-25 % der mittleren Korngröße beträgt [Res00]. Dabei steigt das Gesamtporenvolumen ε eines trockenen Kornhaufwerks mit größerem Steigungsmaß n , also engerer Kornverteilung, während die mittlere Porengröße mit zunehmendem Lageparameter x' ansteigt. Portlandzemente der Festigkeitsklasse CEM I 52,5 R besitzen im Vergleich zu Portlandzementen der Festigkeitsklasse CEM I 32,5 R ein steileres Steigungsmaß bei kleinerem Lageparameter. Folglich ist das Gesamtporenvolumen eines CEM I 32,5 R im Vergleich zu einem CEM I 52,5 R kleiner und der mittlere Porendurchmesser größer, siehe Tabelle 2.3.1.

Tabelle 2.3.1: Granulometrische Eigenschaften von Zementen

Zement	Lageparameter x'	Steigungsmaß n	Porenvolumen ε
	μm	-	Vol.-%
CEM I 32,5 R	~ 30	> 0,85	~ 45
CEM I 52,5 R	~ 10	> 0,98	~ 50

Diese Verhältnisse spiegeln sich im Wasseranspruch der Zemente bei der Ermittlung der Normsteife nach DIN EN 196-3 wider: Der Wasseranspruch eines CEM I 32,5 R beträgt rund 25-28 M.-% und der eines CEM I 52,5 R rund 30-35 M.-% vom Zementgewicht [Thi02]. Ebenfalls kann der Einfluss der Porosität bei der Ermittlung von Ausbreitmaßen von Normmörteln festgestellt werden. So zeigten Normmörtel aus Zementen mit geradliniger Kornverteilungskurve bei einem Steigungsmaß n zwischen 0,97 und 1,03, einer spezifischen Oberfläche nach Blaine zwischen 3500 und 4500 cm^2/g und einem Lageparameter x' zwischen 14 und 19 μm die höchsten Mörtelausbreitmaße [Ren85]. Daraus wurde gefolgert, dass diese granulometrischen Kennwerte ein für die Verarbeitbarkeitseigenschaften günstiges Verhältnis zwischen dem physikalisch gebundenen

Wasser und dem rheologisch freien Wasser zur Erzeugung eines Schmierfilms ergeben.

Um ein Kornhaufwerk in eine Suspension zu überführen, wird der Mindestwassergehalt benötigt. Dies ist der Wassergehalt, der erforderlich ist, um die Oberflächen der Feststoffpartikel zu benetzen und die Hohlräume des Kornhaufwerks zu füllen. Er kennzeichnet den Übergang zwischen einem Kornhaufwerk und einer Suspension, an dem sich die scheinbare Kohäsion durch die Reduzierung der Kapillarkräfte verliert und das Korngemisch bei Energieeinwirkung zu fließen beginnt [Pun02, Sch73], siehe Bild 3.3.2. Der Übergang tritt in der Regel schlagartig auf. Ab diesem Wassergehalt sind die Suspensionseigenschaften durch Wasser und Fließmittel steuerbar. Unterhalb des Mindestwassergehalts weist eine Suspension nur unzureichende Verarbeitbarkeitseigenschaften auf, während höhere Wassergehalte die Sedimentation sowohl grober Gesteinskörner als auch des Mehlkorns fördern.

Der Mindestwassergehalt eines Kornhaufwerkes ist dabei von der Packungsdichte abhängig. Für Kornhaufwerke aus reaktivem Material, wie z. B. Zement, kommt zu den oben genannten Eigenschaften noch der Einfluss der ersten Hydrationsreaktionen nach der Wasserzugabe hinzu, siehe Abschnitt 3.3.4.

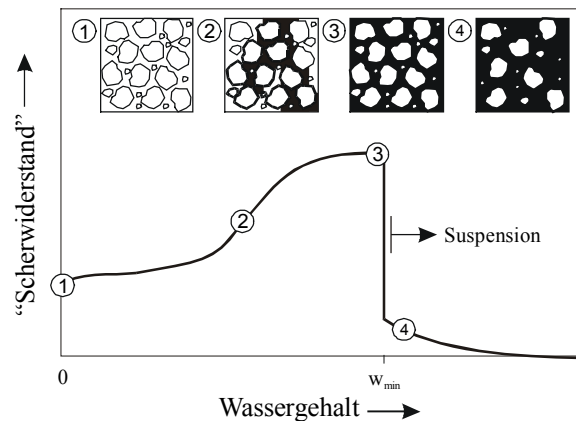


Bild 3.3.2: Scherwiderstand eines Kornhaufwerks in Abhängigkeit vom Wassergehalt beim Übergang in eine Suspension

Der Hohlraumgehalt eines Kornhaufwerks und somit auch sein Mindestwassergehalt lässt sich durch die Zugabe eines Füllers wirksam vermindern. Dabei ist die zu erzielende Packungsdichte von der Kornform und der Korngrößenverteilung beider Kornhaufwerke abhängig. Daher variiert bei gegenseitigem Austausch der einzelnen Haufwerke die erzielbare Packungsdichte und das volume-

trische Verhältnis der mehlfeinen Stoffe, das zur dichtesten Packung führt. Bei gegenseitigem Austausch zweier unterschiedlicher Kornhaufwerke wird in der Regel zuerst ein füllender Effekt beobachtet, bis bei einem bestimmten Mischungsverhältnis die höchste Packungsdichte erreicht ist. Bei weiterem Austausch über das Optimum hinaus wird die Packungsdichte wieder aufgelockert und die Porosität vergrößert, siehe Bild 3.3.3. Dies führt bei vollständigem Austausch zur Packungsdichte des Füllmehlkorns [Lar99, Pun02, Res00, Sch59]. Die Füllerwirkung zwischen zwei Kornhaufwerken ist dabei um so größer, je mehr sie sich durch Feinheit, Korngrößenverteilung oder Kornform unterscheiden.

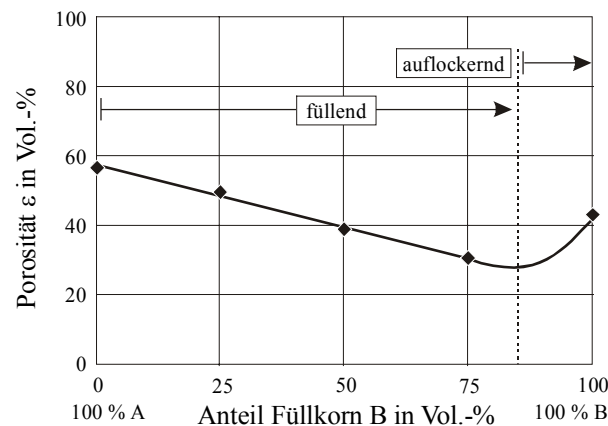


Bild 3.3.3: Veränderung des Hohlraumgehalts eines Kornhaufwerks A bei Austausch durch ein gröberes Korn B

Zusätzlich wird der Mindestwassergehalt von der spezifischen Oberfläche des Kornhaufwerkes beeinflusst. Bei sehr feinen Stoffen kann der Wasserbedarf zum Benetzen der Oberfläche überwiegen und der Wasseranspruch steigt, bevor die dichteste Packung, die theoretisch möglich wäre, erreicht ist. Ausgeprägt ist dieser Effekt bei der Verwendung von Silikastaub mit einem im Vergleich zu Zement etwa 40-fach kleineren mittleren Korndurchmesser. So kann die Verarbeitbarkeit von Beton, insbesondere die Viskosität, bei Zugabe von bis zu 4 M.-% Silikastaub verbessert werden, bevor sich die Verarbeitbarkeit durch eine starke Erhöhung der Fließgrenze wieder verschlechtert [Wal02]. Um die Füllerwirkung in Kornhaufwerken granulometrisch zu beurteilen und um den Mindestwassergehalt zu bestimmen, eignen sich das β_p -Wert-Verfahren [Oka95, Tak98a, Tak98b], siehe Abschnitt 5.5.4, sowie das Puntke-Verfahren [Pun02].

Der Schlüssel zur Herstellung von selbstverdichtendem Beton liegt in der Bestimmung des optimalen Wassergehalts [Mae98, Oka95]. Ausgangspunkt ist

dabei die Ermittlung des Mindestwassergehalts der verwendeten Mehlkornmischung. Für die granulometrische Optimierung selbstverdichtender Betone gilt analog das oben genannte. Günstige Verarbeitbarkeitseigenschaften lassen sich durch ein gut abgestuftes Mehlkorngemisch mit einer geringen Porosität und einer breiten Kornverteilung erzielen. Dadurch wird das Wasserrückhaltevermögen erhöht und der Beton reagiert unempfindlicher gegen Schwankungen im Wassergehalt. Danach sind zwei gegenläufige Effekte zu beachten. Auf der einen Seite muss ein gewisser Wasserüberschuss einkalkuliert werden, der durch die ersten Hydratationsprodukte des Zements nach der Wasserzugabe gebunden wird und für die rheologischen Eigenschaften des Kornaufwerks nicht mehr zur Verfügung steht, siehe Abschnitt 3.3.4. Auf der anderen Seite verringert sich der Mindestwassergehalt durch die Verwendung von Fließmitteln in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Zementes, siehe Abschnitt 3.4. Somit stellt die Granulometrie nur eine Teiloptimierung dar. Zusätzlich müssen die Anfangsreaktionen des Zements sowie die Wirkungsweise des verwendeten Fließmittels im gleichen Maße betrachtet und optimiert werden. Gerade dieser Umstand findet in den vorhandenen Rezepturenentwicklungsverfahren keine systematische Berücksichtigung.

3.3.4 Einfluss der Hydratation des Zements auf die Verarbeitbarkeit

3.3.4.1 Allgemeines

Mehlfeine Stoffe können in die Gruppen reaktiv oder inert eingeteilt werden. Zu den wichtigsten reaktiven Feinstoffen zählen der hydraulisch erhärtende Portlandzement, die puzzolanisch reagierenden Flugaschen und Silikastäube sowie der latent-hydraulisch reagierende Hüttensand. Die wichtigsten Vertreter der inerten oder nahezu inerten mehlfeinen Stoffe in der Betontechnologie sind Kalksteinmehl und Quarzmehl. Den größten Einfluss auf die Verarbeitbarkeit hat dabei der Portlandzementklinker als wichtigster hydraulisch reagierender Hauptbestandteil des Zements.

3.3.4.2 Hydratation des Zements

Zement besteht aus feingemahlenem Portlandzementklinker mit den Klinkerphasen Tricalciumsilicat (C_3S), Dicalciumsilicat (C_2S), Tricalciumaluminat (C_3A) und Calciumaluminatferrit ($C_2(A,F)$) sowie aus Calciumsulfat, das zur Regelung des Erstarrungsverlaufs zugesetzt wird. Nach der Wasserzugabe zum Zement laufen eine Reihe komplexer Reaktionen ab, bei denen wasserhaltige Verbindungen – die Hydratphasen – aus den Zementbestandteilen entstehen. Die Hydratation lässt sich zeitlich in drei Phasen unterteilen [Loc76, Loc80,

Ric69]. In der ersten Phase unmittelbar nach der Wasserzugabe bilden die Calciumaluminat mit dem Calciumsulfat Ettringit. Diese ersten Reaktionsprodukte auf den Zementkornpartikeloberflächen führen bei sulfatoptimierten Systemen noch zu keiner Gefügebildung und beeinflussen die rheologischen Eigenschaften der Zementleimsuspension damit nur durch die damit verbundene Wasserbindung, siehe Abschnitt 3.3.4.3. Im Anschluss daran folgt eine Ruheperiode von 4 bis 6 Stunden, in der fast keine Reaktionen ablaufen. Nach der Ruheperiode schließt sich die zweite Hydratationsstufe durch ein Wiedereinsetzen der Hydratation an. Diese Stufe ist durch die Entstehung langfaseriger Calciumsilicathydrate (CSH) gekennzeichnet, die aus den Calciumsilicaten C_3S und C_2S unter Abspaltung von Calciumhydroxid entstehen. Innerhalb dieser Periode bis rund 24 Stunden nach Wasserzugabe bildet sich ein Grundgefüge in dem zunehmend erstarrten Zementleim aus. In der dritten Hydratationsstufe entwickelt sich ein stabiles Zementsteingefüge, indem der Porenraum des Grundgefüges durch Wachstum von CSH-Phasen sowie der Aluminat- und Ferritphasen ausgefüllt wird. Nach etwa 28 Tagen sind in der Regel rund 90 Prozent der Hydratation abgeschlossen. Der Hydratationsverlauf und die entstehenden Hydratationsprodukte können durch Zusatzmittel und Temperatur beeinflusst werden [Kre85a, Ric83].

3.3.4.3 Erstarrungsoptimierung von Zement

Für gute und ausreichend lange Verarbeitbarkeitseigenschaften von Mörtel und Beton ist - auch im Hinblick auf die Verwendung von Zusatzmitteln - die erste Hydratationsstufe mit ihren unmittelbaren Lösungsreaktionen maßgebend. So spielt das zur Erstarrungsregelung zugesetzte Calciumsulfat bei der Bildung der ersten Hydratationsprodukte eine entscheidende Rolle. Die Abstimmung der Löslichkeit des Sulfatträgers auf die Reaktivität der Aluminatphasen des Portlandzementklinkers wird als Sulfatoptimierung bezeichnet. Dabei ist in der Regel ein Zement umso reaktiver, je höher sein C_3A -Gehalt insgesamt und der sofort lösliche Alkalianteil der Zementpartikel ist. Bei der Sulfatoptimierung wird die Löslichkeit des Sulfatträgers durch das Mischungsverhältnis zwischen Anhydrit und Halbhydrat variiert. Daraus ergeben sich vier mögliche Reaktionsabläufe für die erste Hydratationsstufe [Loc76, Loc80, Loc82, Loc83], siehe Bild 3.3.4.

Die günstigsten Verarbeitbarkeitseigenschaften von Mörtel und Beton werden erzielt, wenn sich in der ersten Hydratationsstufe ausschließlich feinkörniger Ettringit bildet, der sich als feiner Reaktionssaum, der sogenannten Ettringithülle, auf den Oberflächen der Zementpartikel anlagert. Er bewirkt die größtmögliche Beweglichkeit des Zementleims sowie das geringste Ansteifverhalten. Diese Ettringithülle wird erzeugt, indem C_3A mit hoher Reaktionsfähigkeit ein

hohes Sulfatangebot in der Lösung bereitgestellt wird, beziehungsweise indem C_3A mit geringer Reaktionsfähigkeit ein geringes Sulfatangebot in der Lösung zur Verfügung gestellt wird.

Ist die Reaktionsfähigkeit des C_3A gering und das Sulfatangebot in der Lösung zu hoch, kommt es neben der Bildung der Ettringithülle zusätzlich durch das Sulfatüberangebot zur Bildung von Sekundärgips. Es entstehen relativ große, tafelförmige und nadelförmige Kristalle, die schnell den Porenraum zwischen den Zementpartikeln überbrücken. Diese Gefügebildung wird als falsches Erstarren bezeichnet und führt zum Verlust der Verarbeitbarkeitseigenschaften. Da es jedoch relativ labil ist, kann es durch zusätzliche Mischenergie wieder aufgebrochen werden. Somit lässt sich eine, wenn auch ungünstigere, Verarbeitbarkeit wiederherstellen.

Der umgekehrte Fall einer hohen Reaktionsfähigkeit des C_3A bei einem geringen Sulfatangebot in der Lösung hat den weitaus nachteiligeren Effekt auf die Verarbeitbarkeit. Aufgrund des Sulfatmangels reicht das Sulfatangebot nicht für die Ettringitbildung aus. Stattdessen bilden sich tafelförmiges Monosulfat und Calciumaluminathydrat im Porenraum zwischen den Zementpartikeln, die den Porenraum überbrücken und ein festes Gefüge ausbilden. Diese Reaktion ist nicht reversibel und führt sofort zum Verlust der Verarbeitbarkeit. Dieser Vorgang wird als schnelles Erstarren bezeichnet. Die schnelle Hydratation der Calciumaluminat bei Sulfatmangel kann auch nicht durch verzögernde Zusatzmittel vermieden werden [Ric04].













Reaktions- fähigkeit des C_3A	Sulfat- angebot in der Lösung	Hydratationszeit		
		10 Minuten	1 Stunde	3 Stunden
		Rekristallisation des Ettringits →		
gering	gering	Ettringithülle  plastisch	 plastisch	 erstarrt
hoch	hoch	Ettringithülle  plastisch	 steif- plastisch	 erstarrt
hoch	gering	Ettringithülle C_4AH_{13} - Monosulfat im Porenraum  erstarrt	 erstarrt	 erstarrt
gering	hoch	Ettringithülle Sek. Gips im Porenraum  erstarrt	 erstarrt	 erstarrt

Bild 3.3.4: Schematische Darstellung der Gefügeentwicklung beim Erstarren von Portlandzement in Abhängigkeit von der Reaktionsfähigkeit des C_3A und vom Sulfatangebot [Loc80]

Zusätzlich ist zu beachten, dass das eingestellte Optimum zwischen der Reaktivität des C_3A und der Löslichkeit des Sulfats an einen bestimmten Temperaturbereich von in der Regel 20 °C gekoppelt ist [Kre85a]. So führt eine erhöhte Temperatur zu einem stärkeren Umsatz von C_3A bei gleichzeitiger Abnahme der Löslichkeit des Sulfatträgers. Dadurch wird die Anfangshydratation in Richtung Monosulfat- und Calciumaluminathydratbildung verschoben. Auf der anderen Seite führen niedrige Temperaturen zu einer höheren Löslichkeit des Sulfats verbunden mit einer Verringerung der Reaktivität des C_3A . Daher kann es in diesem Fall zur Bildung von Sekundärgips kommen, siehe Bild 3.3.5. Zu beachten sind die Lösungsvorgänge auch bei der Auswahl des Füllers zur granulometrischen Optimierung. So kann die Sulfatoptimierung durch Zusatzstoffe in großen Mengen, wie sie bei der Herstellung von SVB benötigt werden, beeinflusst werden.

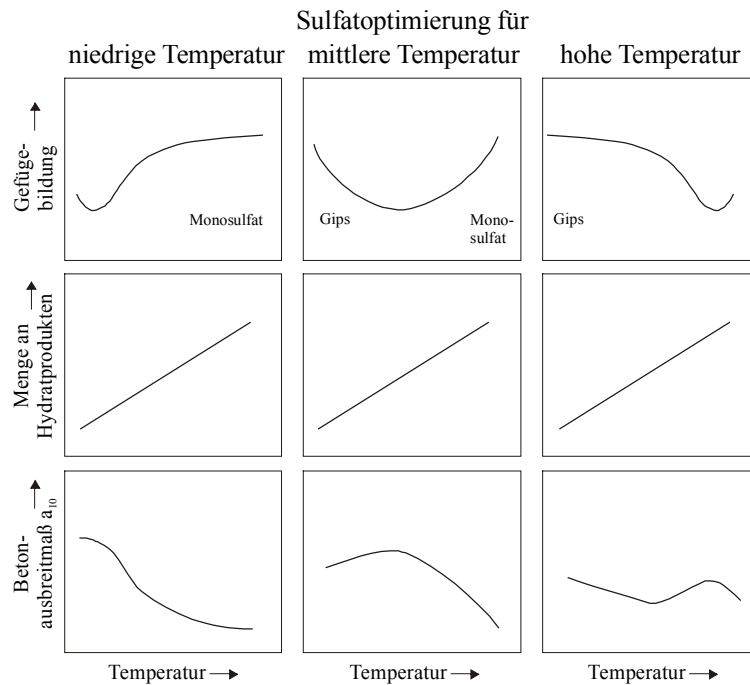


Bild 3.3.5: Schematische Darstellung des Einflusses der Temperatur auf Menge und Art der Reaktionsprodukte und damit auf die Betonkonsistenz a_{10} für unterschiedliche Optimierungstemperaturen des Zements [Kre85a]

3.3.5 Einfluss der Struktur von Mehlkornsuspensionen auf die Verarbeitbarkeit

3.3.5.1 Allgemeines

Die Verarbeitbarkeit einer zementhaltigen Suspension ist direkt von der Suspensionsstruktur abhängig. Dabei unterliegt die Suspension einer Reihe innerer und äußerer Kräfte. Wird ein Kornhaufwerk in eine Suspension überführt, bestimmen Kapillarkräfte das Verformungsverhalten des teilbefeuchteten Kornhaufwerks, siehe auch Bild 3.3.2. Danach wird das Vorhandensein einer Fließgrenze und der Betrag ihrer Größe im Wesentlichen von interpartikulären Kräften zwischen mehlfeinen Stoffen bestimmt, während die Viskosität vom Wasser-Feststoff-Volumenverhältnis abhängt. Die in einer Flüssigkeit verteilten Partikel können sich nicht frei untereinander bewegen, da sie immer Anziehungs- und Abstoßungskräften unterworfen sind. Das Zusammenwirken der interpartikulären Kräfte bestimmt, ob sich die Teilchen gegenseitig abstoßen oder anziehen

und bestimmen damit den Grenzwert der Scherbeanspruchung (Fließgrenze) sowie die Stabilität der Suspension [Pap63, Tat83b]. Die größeren Partikel und die Gesteinskörnung unterliegen demgegenüber der Gewichtskraft.

3.3.5.2 *Kapillarkräfte*

Kapillarkräfte entstehen dadurch, dass die Teilchen einer feinstoffreichen Suspension ein Netz feiner Kanäle bilden, in denen die Oberflächenspannung der dazwischenliegenden Flüssigkeit eine ausschlaggebende Rolle spielt [Pap63]. Besonders dominant und verarbeitbarkeitsbeeinflussend sind Kapillarkräfte bei teilbefeuchteten Kornhaufwerken unterhalb des Mindestwassergehalts (siehe Abschnitt 3.3.3). Der kapillare Unterdruck im flüssigkeitsgefüllten Bereich des Kornhaufwerks ist dabei die festigkeitsbestimmende Größe [Sch73]. Die Kapillarkräfte innerhalb eines teilgesättigten Kornhaufwerks bestimmen den Verformungswiderstand. Sie sind kurz vor dem Erreichen des Mindestwassergehalts am größten. Weiterhin behindert die Oberflächenspannung des Wassers eine Umlagerung der Körner und somit die Verdichtung des teilgesättigten Kornhaufwerks. Erst bei Wassersättigung verlieren sich die Kapillarkräfte und das Kornhaufwerk kann soweit verdichtet werden, dass es seine charakteristische, dichteste Lage erreicht [Pun02].

Darüber hinaus gewinnen die Kapillarkräfte erst wieder bei jungem Beton an Bedeutung, da sie dort das Kapillar- oder Fröhschwinden beeinflussen.

3.3.5.3 *Interpartikuläre Kräfte*

Interpartikuläre Kräfte zwischen Teilchen in einer Suspension können anziehend und abstoßend sein. Ihre Wechselwirkungen bestimmen die Struktur der Suspension. Dabei kann zwischen einer dispergierten, agglomerierten und flockulierten Struktur unterschieden werden, siehe Bild 3.3.6. Überwiegen die abstoßenden Kräfte, ist die Suspension dispergiert bis teilagglomeriert. Dominieren die anziehenden Kräfte, ist die Suspension agglomeriert beziehungsweise flockuliert. Diese Wechselwirkungen lassen sich für kolloidale Systeme durch die DLVO-Theorie (Derjaugin-Landau-Verwey-Overbeek Theorie) beschreiben.

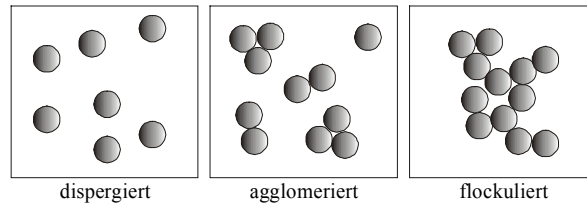
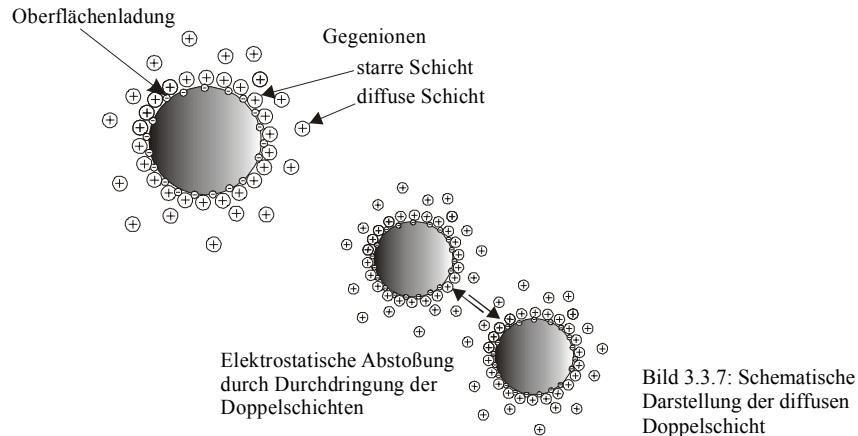


Bild 3.3.6: Schematische Darstellung von Suspensionsstrukturen

Die Abstoßungskräfte sind elektrostatischen Ursprungs. Aufgrund der Kristallstruktur und ihres höheren Energieniveaus weisen die meisten Oberflächen von Partikeln eine elektrische Ladung auf, wenn sie mit einer Elektrolytlösung in Kontakt gebracht werden. Die geladenen Oberflächen beeinflussen die Verteilung von Ionen in der flüssigen Phase, so dass es zu einem Übergang von Ladungsträgern kommt. Dabei wird die Oberflächenladung des Partikels lösungsseitig durch eine gleichgroße Anzahl entgegengesetzt geladener, hydratisierter Ionen kompensiert, siehe Bild 3.3.7. Sie lagern sich auf der Partikeloberfläche als Gegenionen in Form einer starren Schicht an. Die restlichen Ladungsträger sind infolge der Wärmebewegung diffus in unmittelbarer Nähe um das Partikel verstreut. Zusammen bilden die Gegenionen die elektrische Doppelschicht, die aus einer festen Schicht adsorbierter Ionen sowie aus einer diffusen Schicht beweglicher Ionen besteht. Da die geladenen Teilchen lösungsseitig von einer gleichgroßen Anzahl Gegenionen umgeben sind, sind sie außerhalb ihrer diffusen Doppelschicht als Neutralteilchen anzusehen. Eine Wechselwirkung in Form elektrostatischer Abstoßung tritt erst ein, wenn sich die diffusen Doppelschichten zweier Teilchen durchdringen. Bewegt sich das Teilchen relativ zur Flüssigkeit, verschiebt sich die Flüssigkeit innerhalb der Doppelschicht und deformiert diese. Das daraus entstehende elektrische Potential in der Doppelschicht am Übergang zwischen starrer und diffuser Schicht ist die einzig messbare elektrische Größe. Sie entspricht annäherungsweise dem Zeta-Potential. Damit lassen sich unter anderem der Aufbau der Doppelschicht und das Sorptionsverhalten bestimmen. Zu beachten ist, dass das Zeta-Potential durch die Lösungszusammensetzung beeinflusst wird. Mit zunehmender Ionenkonzentration in der Suspension verringert sich die Reichweite der diffusen Schicht und damit das elektrostatische Abstoßungspotential zwischen den Teilchen [Näg87, Son70, Str02, Tat83b].



Dem stehen die van-der-Waals Kräfte als anziehende Kräfte gegenüber. Es handelt sich um eine nicht-chemische Bindungsform zwischen Molekülen und Atomen infolge eines Dipolmoments. Die Dipole können sowohl permanent und ohne äußere Einwirkung vorhanden sein als auch durch äußere Einwirkung hervorgerufen werden. Zwischen unpolaren Molekülen treten nur die induzierten Dipolmomente auf, die durch die ständige Bewegung der Atome und Moleküle durch Deformation der Elektronenhüllen entstehen. Ein spontanes Ungleichgewicht der Elektronen in der Elektronenhülle bewirkt einen zeitlich veränderlichen Dipol, der in der Lage ist, ein benachbartes Atom oder Molekül zu beeinflussen. Es ergibt sich somit eine Dipol-Dipol Bindung, die je nach Art des Atoms oder Moleküls, ihrem Abstand zueinander und anderen vorhandenen Kräften mehr oder weniger ausgeprägt ist. Infolge der Summation über alle in dem Volumen enthaltenen Atome nehmen sie für kolloide und makroskopische Partikel große Werte an und besitzen eine beträchtliche Reichweite. Die van-der-Waals'sche Anziehungskraft kann bei kolloidalen Teilchen etwa das millionenfache der Gewichtskraft erreichen. Diese Anziehungskräfte sind deshalb für die Struktur disperser Systeme von großer Bedeutung [Ren87, Rum74, Son70].

Nach der DLVO-Theorie bestimmt die Überlagerung der elektrostatischen Abstoßungs- und der van-der-Waals'schen Anziehungsenergie nach Vorzeichen und Größe der Wechselwirkungsenergie die Stabilität disperser Systeme. Nähern sich zwei Partikel in einer Suspension einander an, beginnen die diffusen Doppelschichten sich gegenseitig zu beeinflussen. Dies verändert die Verteilung der Ionen in beiden Doppelschichten und erhöht die freie Energie des Systems, was zu einer Abstoßung zwischen den Teilchen führt. Die Abstoßungsenergie

nimmt exponentiell mit der Entfernung ab [Son70, Tat83b]. Gleichzeitig wirken Anziehungskräfte zwischen den Teilchen, die von der Anziehung zwischen den einzelnen Atomen eines Partikels herrühren. Für einige Atome nehmen diese van-der-Waals Kräfte schnell mit der Entfernung ab, jedoch weniger schnell beim Zusammenwirken mehrerer Teilchen. Die Anziehungsenergie ist invers proportional zum Quadrat des interpartikulären Abstands [Son70]. Die resultierende Potenzialenergiekurve, die die Wechselwirkung zwischen den Partikeln beschreibt, erhält man durch Addition der Anziehungs- und der Abstoßungspotenzialkurve. Aus der Abklingfunktion der beiden Energiekurven folgt, dass bei kleinen Abständen die Anziehungsenergie überwiegt, während bei einem mittleren Abstand die elektrostatische Abstoßungsenergie überwiegen kann.

Bild 3.3.8 zeigt die Verläufe der Abstoßungs- und der Anziehungsenergie in Abhängigkeit vom Teilchenabstand und die resultierenden Potenzialkurven für unterschiedliche Elektrolytkonzentrationen. Bei geringer Ionenkonzentration entsteht als Resultierende ein großes Abstoßungspotenzial. Die Partikel können diese „Energiebarriere“ normalerweise nicht überwinden und liegen daher dispergiert vor. Mit zunehmender Ionenkonzentration wird die Barriere kleiner und verschwindet schließlich ganz. Die van-der-Waals Kräfte werden nun maßgebend und die Partikel nähern sich bis zum Erreichen des Potenzialminimums einander an. Aus den Partikeln entstehen Flocken, die dann unter dem Einfluss der Schwerkraft ausfallen. Es kommt zur Sedimentation.

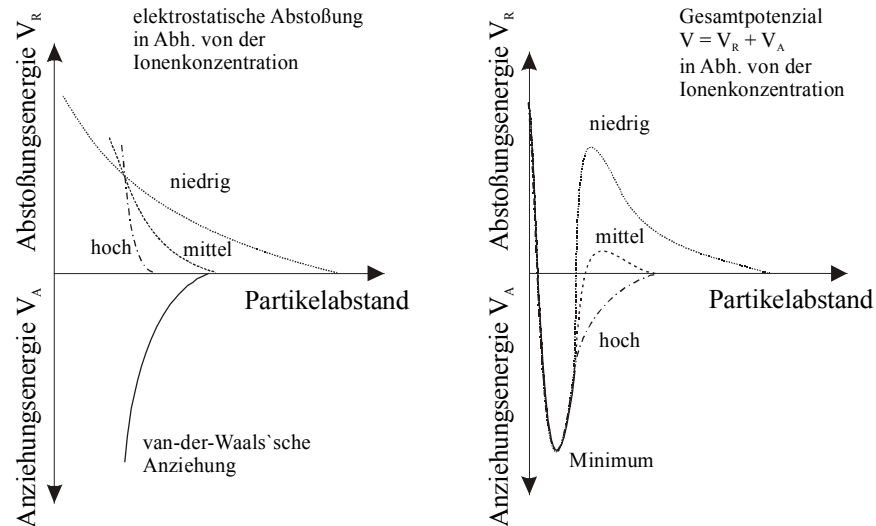


Bild 3.3.8: Überlagerung der Abstoßungs- und Anziehungsenergie für verschiedene Ionenkonzentrationen in Abhängigkeit vom Partikelabstand [Tat83b]

3.3.5.4 Gewichtskraft

Durch die Gewichtskraft bzw. Schwerkraft wird auf alle Partikel und Körner in Suspension eine Abwärtsbewegung ausgeübt. Dabei wirkt sie sehr unterschiedlich auf Partikel verschiedener Größen. Ihr Einfluss nimmt mit zunehmender Feinheit der Teilchen ab. Für das Verhalten von Körnern, die untereinander kaum Oberflächenkräfte ausbilden, wie z. B. Sand und Kies der Gesteinskörnung, ist sie die maßgebende Kraft.

3.3.5.5 Brownsche Bewegung

Kolloidale Teilchen mit einem Korndurchmesser kleiner $1\ \mu\text{m}$ unterliegen der Brownschen Bewegung. Sie ist eine nicht-gerichtete Bewegung, die aus Schwankungserscheinungen um das thermodynamische Gleichgewicht resultiert. Kolloidale Partikel stehen nicht unter einem konstanten hydrostatischen Druck und unterliegen nicht der Gewichtskraft, obwohl ihre Dichte größer als die des dispergierenden Mediums ist [Ren87, Str02]. Im Allgemeinen werden verfahrenstechnische Prozesse durch kolloidale Teilchen erschwert [Rum74]. Dies gilt auch für die Steuerung der Verarbeitbarkeit von Mörteln und Betonen.

3.3.5.6 Schlussfolgerungen

Die Struktur kolloidaler Suspensionen kann mit der DLVO-Theorie beschrieben werden. Sie lässt sich erfolgreich auf die meisten kolloidalen Phänomene anwenden. Die Rheologie zementhaltiger Suspensionen wird jedoch von Partikeln bestimmt, die mehrheitlich größer als die in wahren kolloidalen Systemen sind. Hier sind vor allem die unhydratisierten Körner, die von einer dünnen Schicht Hydratationsprodukte umgeben sind, zu nennen. Daraus folgt, dass diese Abstoßungs- und Anziehungskräfte weniger signifikant in zementhaltigen Suspensionen sind und nur über Entfernungen, die im Vergleich zur Partikelgröße klein sind, wirken [Tat83b]. Weiterhin ist Portlandzement, durch den Klinkerbrennprozess bedingt, sehr heterogen zusammengesetzt. Ein Klinkerpartikel weist durch die unterschiedlichen kristallinen Strukturen seiner Phasen sowohl positiv als auch negativ geladene Oberflächen auf, so dass die elektrostatischen Kräfte gleichzeitig abstoßend und anziehend wirken können. In Suspension stellt sich in jedem Fall zwischen den Klinkerpartikeln mit ihren ersten Hydratationsprodukten eine flockulierte Struktur ein, auf die auch die Gewichtskraft wirkt. Mit zunehmender Agglomeration erhöht sich die Fließgrenze aber auch die Stabilität im Sinne einer homogenen Zementleimstruktur, da sich die Agglomerate selbst stützen und darüber hinaus die Gesteinskörnungen, auf die ebenfalls die Gewichtskraft wirkt, in ihrer Lage halten können.

3.4 Einfluss von Fließmitteln auf die Verarbeitbarkeit

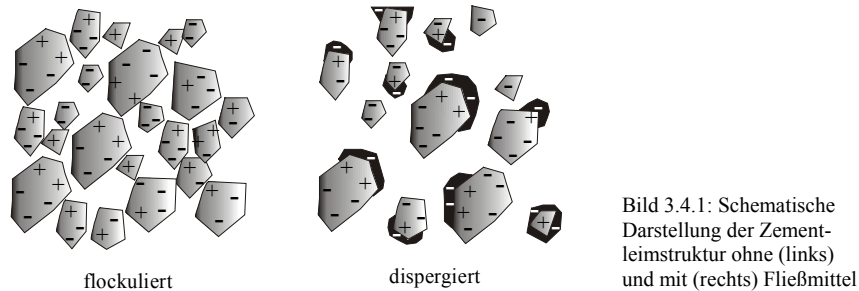
3.4.1 Allgemeines

Die unterschiedlichen Klinkerpartikel und insbesondere die Hydratationsprodukte der Aluminate aus der ersten Hydratationsstufe bilden aufgrund elektrostatischer und van-der-Waals'scher Anziehungskräfte eine flockulierte Struktur (siehe Abschnitt 3.3.5.6). Dabei wird ein Teil des Zugabewassers in den Agglomeraten eingeschlossen und rheologisch unwirksam gebunden, d. h. es kann nur wenig zur Fließfähigkeit des Leimes beitragen, siehe Bild 3.4.1 - links.

Fließmittel sind organische Polyelektrolyte. Nach der Zugabe eines Fließmittels zu einer zementhaltigen Suspension werden die Fließmittelmoleküle an den Zementkornoberflächen sorbiert [And88, Dia78, Uch92]. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Fließmittelmoleküle stärker von den Calciumaluminaten und Calciumferriten als von den Calciumsilicaten sorbiert werden [Ram83, Yos02]. Ebenfalls erfolgt eine starke Sorption von Fließmittel durch Ettringit, während Gips und Calciumhydroxid kaum Fließmittel sorbieren [Pla03]. Darüber hinaus

können Fließmittel die Ausbildung des Ettringits während der Hydratation beeinflussen. Es entstehen kleine, kurzprismatische Ettringitkristalle, während sich die gebildete Menge nicht verändert [Pla03, Sar92].

Nach der Sorption der Fließmittelmoleküle auf den Partikeloberflächen erfolgt ein Aufbrechen der flockulierten Struktur des Leimes. Die Partikel werden dispergiert und Wasser, das in den Agglomeraten eingeschlossen war, steht nun zur Verflüssigung zur Verfügung, siehe Bild 3.4.1 - rechts. Dies führt zu einer höheren Beweglichkeit des Leimes [Ait94, Ram87, Spa95]. Je nach Wirkstoffgruppe des Fließmittels werden die einzelnen Partikel elektrostatisch oder durch eine kombinierte sterisch-elektrostatische Wirkung voneinander getrennt.



3.4.2 Wirkungsweise von Polykondensaten

Die Wirkungsweise klassischer Polykondensat-Fließmittel auf Wirkstoffbasis von Naphthalinsulfonat und Melaminsulfonat beruht im Wesentlichen auf der Änderung des Zeta-Potentials. Sie bestehen aus einer organischen Hauptkette mit einer dichten negativen Ladungsbelegung durch Sulfongruppen. Die Sorption dieser geladenen Polymere auf der Partikeloberfläche erzeugt Partikel mit gleicher Ladung, die sich demzufolge abstoßen. Dadurch werden die Teilchen dispergiert und ein Wiederannähern verhindert, siehe Bild 3.4.2. Dieser Effekt hält solange vor, wie genügend Fließmittelmoleküle für die Grenzflächen zwischen den Partikeln und der Lösung vorhanden sind. Die Menge der zur Verfügung stehenden Fließmittelmoleküle nimmt jedoch mit fortschreitender Hydratation ab, da sie durch den Zement und die ständig entstehenden neuen Oberflächen der Hydratationsprodukte sorbiert werden [Ait94]. Der Gehalt an löslichem Alkalisulfat des Zements spielt bei der Wirkungsweise von Polykondensaten eine entscheidende Rolle. Nach [Jia99] existiert ein Optimum zwischen 0,4 und 0,5 % $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$, bei dem die höchste Anfangsverflüssigung und die läng-

ste Verarbeitbarkeitsdauer erzielt wird. Weiterhin ist zu beachten, dass die SO_3 -Gruppen der Polynaphthalinsulfonate die SO_4^{2-} -Gruppen der ersten Hydratationsprodukte ersetzen können. Dies führt zu einer verzögerten Oberflächenhydratationsreaktion und verzögert insbesondere die Frühfestigkeit [Ait94].

Polykondensate zeigen im Allgemeinen eine größere verflüssigende Wirkung, wenn sie einige Minuten nach dem Zugabewasser zugegeben werden. Bei gemeinsamer Zugabe mit dem Zugabewasser zum Zement wird das Fließmittel zum Teil unspezifisch sorbiert und durch entstehende Hydratationsprodukte überwachsen oder in Spalten und Risse der Zementpartikel wirkungslos eingelagert. Dieser Anteil des Zusatzmittels steht damit für die verflüssigende Wirkung nicht mehr zur Verfügung [Chi85, Han99]. Versuche, bei denen der Zugabezeitpunkt der Zusatzmittel variiert wurde, haben gezeigt, dass bei Zementfließen zum Erreichen des Sättigungspunktes etwa die doppelte Menge an verflüssigendem Zusatzmittel benötigt werden kann, sofern das Zusatzmittel nicht einige Minuten nach, sondern zusammen mit dem Zugabewasser dosiert wird [Spa95]. Die verflüssigende Wirkung von Polykondensaten ist oft auf nur eine halbe Stunde begrenzt. Daher ist es z. B. erforderlich, sie bei der Herstellung von Beton der Konsistenzklasse „fließfähig“ vor dem Einbau am Verwendungs-ort zuzugeben.

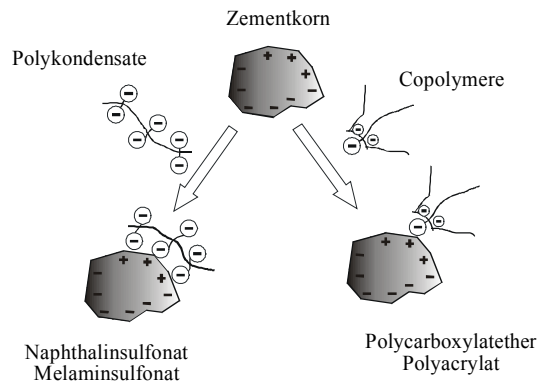
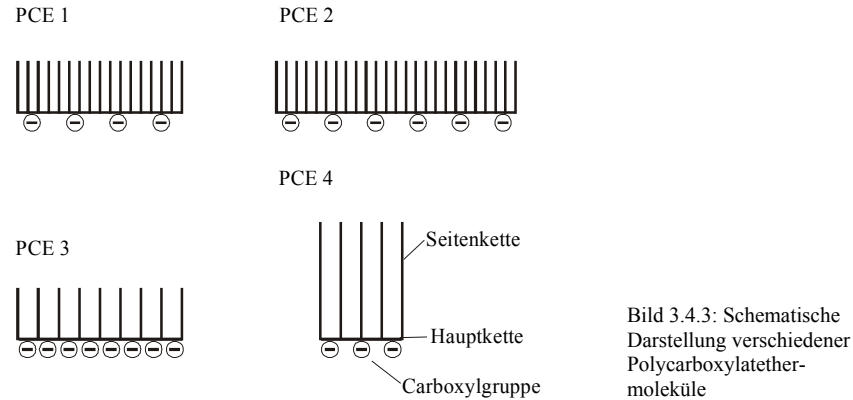


Bild 3.4.2: Schematische Darstellung der Wirkungsweise verschiedener Fließmittel

3.4.3 Wirkungsweise von Polycarboxylatethern

Synthetische organische Polymere mit Carboxylsäuregruppen, sogenannte Polycarboxylatether (PCE), zeichnen sich als hochwirksame Dispergierungsmittel aus. Sie bestehen aus einer Hauptkette und mehreren Seitenketten. Im Vergleich zu den Polykondensaten weisen die Hauptketten der Polycarboxylate eine

schwächere negative Ladungsdichte auf. Zudem werden die Carboxylsäuregruppen nur im alkalischen Milieu ionisiert, siehe Bild 3.4.2. Im Gegensatz zur Struktur der Polykondensate lassen sich Polycarboxylatether-Moleküle gezielt durch das Längenverhältnis zwischen Hauptkette und Seitenkette sowie durch unterschiedliche Ladungsdichten aufbauen [Ham00, Ram98, Sak03], siehe Bild 3.4.3.



Analog zum Wirkungsmechanismus der Polykondensate werden Polycarboxylate mit höherer Ladungsdichte schneller sorbiert. Insgesamt ist die Sorptionsrate im Vergleich zu den Polykondensaten jedoch geringer [Oht97]. Nach der Sorption erfolgt eine sterisch-elektrostatische Dispergierung der Partikel. Neben der elektrostatischen Abstoßung durch die negativ geladenen Gruppen der Hauptkette werden die Partikel hauptsächlich sterisch und somit räumlich durch die Seitenketten voneinander getrennt. Je nach Aufbau des Polycarboxylats ergeben sich unterschiedliche verflüssigende Wirkungen wie eine starke Anfangsverflüssigung bei normaler Verarbeitbarkeitsdauer beziehungsweise eine normale Verflüssigung bei langer Verarbeitbarkeitsdauer [Ham00, Oht97, Sug03]. Im Allgemeinen ist die verflüssigende Wirkung von Polycarboxylaten bei geringerer Dosierung im Vergleich zu den Polykondensaten stärker [Oht97, Sug03, Yam01a]. Eine Erklärung für die verlängerten Verarbeitbarkeitszeiten ist der sogenannte Depot-Effekt. Durch die geringere Sorption der Fließmittelmoleküle bleibt ein größerer Anteil an Polycarboxylaten in der Porenlösung gelöst und kann vergleichbar einer Nachdosierung neue, sich bildende Oberflächen belegen und dispergieren [Bri98, Han99, Yam01b]. Im Gegensatz zu den Polykondensaten beeinflusst der Zugabezeitpunkt von Polycarboxylatethern nicht die Verarbeitbarkeitseigenschaften, so dass die gleiche Wirkung sowohl bei

gleichzeitiger als auch nachträglicher Dosierung erzielt wird [Pla03]. Zur Aktivierung der vollen Leistungsfähigkeit von Fließmitteln auf der Wirkstoffbasis von Polycarboxylatether wird eine längere Mischzeit von mindestens 60 s empfohlen [Bri98].

Die kombinierte sterisch-elektrostatische Dispergierung bringt mehrere Vorteile mit sich. Zum einen ist die Belegung der Zementkornoberflächen durch PCE-Moleküle geringer. Dies führt zu einer verminderten Blockierung der Zementhydratation und zu einer schnelleren Frühfestigkeitsentwicklung. Ferner können aufgrund der sterischen Trennung der Partikel erste Hydratationsprodukte auf der Zementkornoberfläche wachsen, ohne die Verarbeitbarkeit des Betons einzuschränken [Bri98, Kle99]. Polycarboxylate können durch die Variation des Haupt- zu Seitenkettenlängenverhältnisses gezielt zur Förderung bestimmter Verarbeitbarkeitseigenschaften des Frischbetons hergestellt werden. So kann durch eine stärkere Ladungsdichte auf der Hauptkette die Langzeitverarbeitbarkeit z. B. für den Anwendungsfall Transportbeton signifikant erhöht werden. Die Verwendung von Molekülen mit geringer Ladungsdichte auf der Hauptkette in Kombination mit langen Seitenketten führt zu einer starken Anfangsverflüssigung bei schneller Frühfestigkeitsentwicklung und empfiehlt sich daher für die Anwendung in der Betonfertigteilproduktion [Alb01].

Aufgrund der großen Variationsmöglichkeiten bei der Herstellung von Polycarboxylaten kann zur Zeit eine Vorhersage der Wirkungsweise nicht getroffen werden. Daher ist es unerlässlich, in Vorversuchen die Wirksamkeit und Verträglichkeit der gewählten Mehlkorn-Fließmittelkombination zu testen. Dies gilt umso mehr, da die Polycarboxylate empfindlich auf den in der Porenlösung gelösten Sulfatgehalt reagieren. Hohe Sulfatgehalte können zu einer verringerten Verarbeitbarkeit führen, da sich die Hauptketten der Polycarboxylate verknäulen [Yam01a, Yam01b].

3.4.4 Steuerung der Verarbeitbarkeit durch Fließmittel

Die Verarbeitbarkeit von Beton wird von der Zusammensetzung und Struktur des Leims, der Leimmenge, der Art der Gesteinskörnung sowie der Sieblinie und dem Luftgehalt beeinflusst [Thi97]. Die rheologischen Eigenschaften des Leims sind von den physikalischen und chemisch-mineralogischen Eigenschaften des Mehlkorns, dem Wassergehalt und von der Art und Menge des Fließmittels abhängig. Insbesondere ist der Einsatz von leistungsfähigen Fließmitteln bei der Herstellung wasserarmer, mehlkornreicher Hochleistungsbetone, wie z. B. der selbstverdichtenden Betone, unerlässlich. Aufgrund der oben genannten

Eigenschaften werden zur Herstellung selbstverdichtender Betone heutzutage fast ausschließlich Polycarboxylatether verwendet.

Die Suspensionseigenschaften eines Mehlkornleims sind ab dem Mindestwassergehalt durch zusätzliche Wasserzugabe und Fließmittel steuerbar. Das Verformungsverhalten der Suspension kann mit Hilfe eines Rotationsrheometer, siehe Abschnitt 3.2.2.2, ermittelt werden. Die Parameter Fließgrenze g und plastische Viskosität h lassen sich in guter Näherung durch das Bingham-Modell bestimmen. Die Fließgrenze kennzeichnet die Energie, die benötigt wird, um die Suspension zum Fließen zu bringen. Sie hängt hauptsächlich von Kapillarkräften und elektrostatischen Kräften zwischen den Partikeln ab. Die Viskosität beschreibt den Verformungswiderstand der Suspension während des Fließens. Sie wird im Wesentlichen vom Wasser-Feststoffverhältnis bestimmt. Wassergehalt und Fließmittelmenge beeinflussen die Kenngrößen g und h unterschiedlich, siehe Bild 3.4.4. Eine steigende Wassermenge verringert die Fließgrenze g und die Viskosität h durch die Vergrößerung der Wasserfilmdicke um die einzelnen Partikel. Eine steigende Fließmittelmenge setzt nur die Fließgrenze g herab [Spa95]. Fließmittel desagglomerieren die Partikel in der Suspension, ohne das die Viskosität beeinflussende Wasser-Feststoffverhältnis zu verändern.

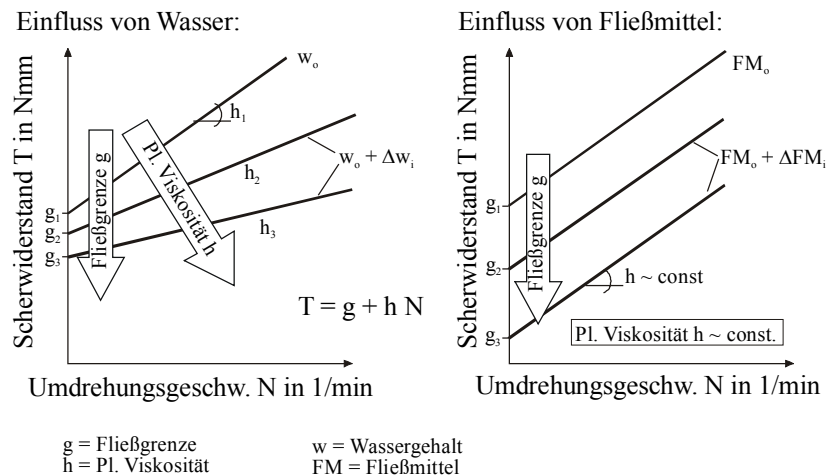


Bild 3.4.4: Einfluss von Wasser und Fließmittel auf die Suspensionseigenschaften

Um die optimale verflüssigende Wirkung eines Fließmittels zu erzielen, wird in Abhängigkeit vom Zement und des Wassergehalts eine bestimmte Dosierung benötigt. Dabei zeigen alle Zement-Zusatzmittelkombination ein typisches Sät-

tigungsverhalten [Ait94, Spa95, Spa97]. Dies lässt sich im Rotationsrheometer ermitteln. Die Sättigungsdosierung ist erreicht, wenn sich durch weitere Fließmittelzugabe der im Rotationsrheometer gemessene Scherwiderstand nicht mehr verringern lässt. An diesem Punkt sind die Partikel vollständig dispergiert und die Fließgrenze der Suspension ist gegen Null reduziert. Eine Fließmittelzugabe über den Sättigungspunkt hinaus führt nicht mehr zu einer Verbesserung des Fließverhaltens, sondern fördert die Sedimentation sowohl der groben Partikel im Zementleim als auch der Gesteinskörnung im Mörtel bzw. Beton. Zur Auswertung wird der gemessene Scherwiderstand über der Fließmitteldosierung aufgetragen, siehe Bild 3.4.5.

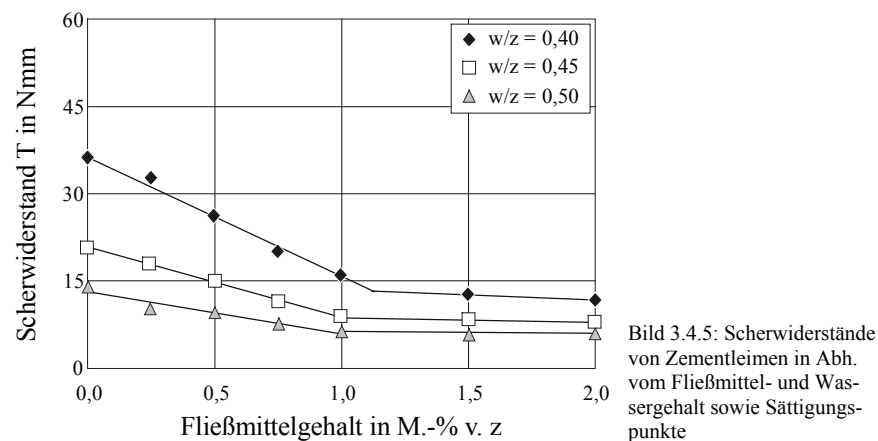


Bild 3.4.5: Scherwiderstände von Zementleimen in Abh. vom Fließmittel- und Wassergehalt sowie Sättigungspunkte

Da bei der Bestimmung des Sättigungspunktes die Scherwiderstände von Zementleimen mit unterschiedlichen Fließmitteldosierungen jeweils zum gleichen Prüfzeitpunkt verwendet werden, werden die Scherwiderstände relativ zueinander verglichen. Der Absolutwert des Scherwiderstandes hat dabei keine Bedeutung. Bei einem anderen Auswertungszeitpunkt und bei einem anderen Messprofil ergäben sich andere Scherwiderstände, die aber relativ zueinander betrachtet zu den gleichen Sättigungsdosierungen führen.

4 Vorgehensweise

Die umfassende Literatursauswertung in Abschnitt 3 zeigt, dass die Steuerung der Verarbeitbarkeit eine herausragende Rolle bei der Verwendung von selbstverdichtendem Beton spielt. Die Steuerung der Verarbeitbarkeit umfasst sowohl

die Einflüsse auf die Einstellung der planmäßigen Verarbeitbarkeit unmittelbar nach dem Mischungsende als auch die Beherrschung der Verarbeitbarkeit in Abhängigkeit von der Zeit bis zum Ende des Einbauvorgangs. Die Einstellung der Verarbeitbarkeit nach dem Mischungsende erfolgt über ein zum Teil sehr aufwendiges, empirisches Rezeptentwicklungsverfahren. Die zeitabhängigen Verarbeitbarkeitseigenschaften werden hingegen in keinem derzeitigen Mischungsentwurf ausreichend berücksichtigt. Um die gesteckten Ziele, siehe Abschnitt 2, zu erreichen, wurden systematische Untersuchungen zu den zwei Themenbereichen Mehlkornoptimierung und Verflüssigung durchgeführt.

Die Mehlkornoptimierung dient der Vorhersage von Anhaltswerten zur Ermittlung des optimalen Wassergehalts aus vorgeprüften granulometrischen Parametern. In Abschnitt 5 wird die Verformbarkeit von Mehlkorn in wässrigen Suspensionen unter Berücksichtigung der Kornart, Kornform, Korngrößenverteilung und Rohdichte der Feststoffpartikel untersucht. Dazu werden erste Modelleime gezielt mit ideal geformten Inertstoffen unterschiedlicher Feinheit zusammengesetzt, um den Einfluss der Kornform und der chemischen Reaktionen gesondert darstellen zu können. Darauf aufbauend werden die Mindestwassergehalte optimierter Leimzusammensetzungen bestimmt, von denen an die Fließgrenze und die Viskosität über Wasser und Fließmittel frei steuerbar wird und zum selbstverdichtenden Mörtel bzw. zum selbstverdichtenden Beton führt.

Die Verflüssigung umfasst die Steuerung der Verarbeitbarkeitseigenschaften durch Wasser und Fließmittel in Abhängigkeit von der Mehlkornzusammensetzung, dem Fließmittel, der Temperatur und der Zeit. Die zugehörigen Untersuchungen in Abschnitt 6 beinhalten orientierende Prüfungen zur Wirkungsweise und Verträglichkeit der neuen Fließmittelgeneration auf der Basis von Polycarboxylatether, um Fehlreaktionen mit den ausgewählten mehlfeinen Stoffen zu vermeiden und um Hinweise zur Dispergierbarkeit und Dispergierungszeit von verschiedenen Leimen und Mörteln zu erhalten. Rheologische Untersuchungen an selbstverdichtenden Mörteln und Betonen zur Verarbeitbarkeitsdauer und zur Stabilität in zum Teil unterschiedlichen Temperaturbereichen geben Aufschluss über die Einflüsse und über die Steuerungsmöglichkeiten der Verarbeitbarkeitseigenschaften selbstverdichtender Betone.

Diese Erkenntnisse führen in Abschnitt 7 dazu, den Betonmischungsentwurf gerade im Hinblick auf das gezielte Steuern der Verarbeitbarkeitseigenschaften über die gesamte Verarbeitungsdauer zu verbessern. Besonders bei der Korrektur eines nicht ausreichend fließfähigen Betons bedarf es konkreter Entscheidungshilfen, ob die Wiederherstellung der Verarbeitbarkeit eventuell durch Fließmittel, Wasser oder sonstige Maßnahmen erfolgen muss. Das Bild 4.1 zeigt

eine Übersicht der einzelnen Schritte zur Herstellung und Steuerung der Verarbeitbarkeitseigenschaften und der jeweiligen Einflussgrößen.

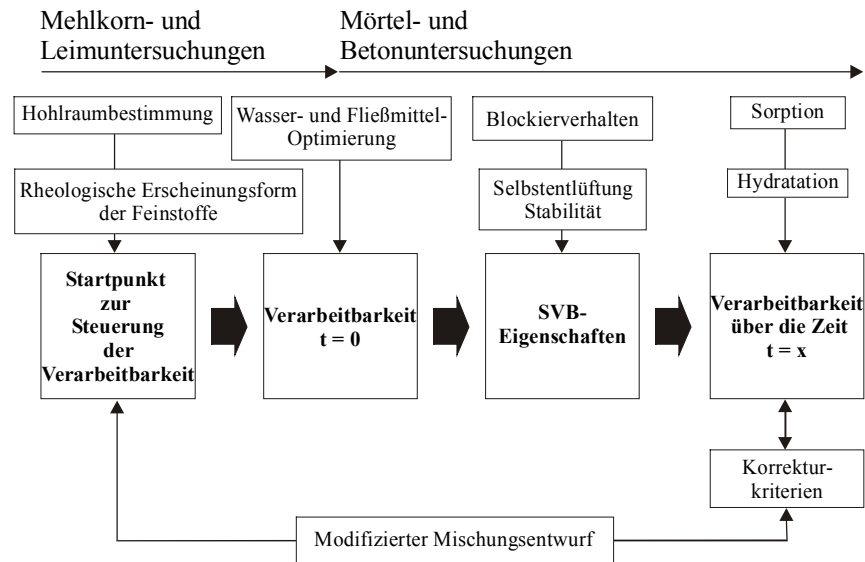


Bild 4.1: Modell zur Steuerung der Verarbeitbarkeitseigenschaften selbstverdichtender Betone

Im Rahmen dieser Arbeit werden grundsätzliche Einflüsse der Mehlkorneigenschaften auf die Verarbeitbarkeit selbstverdichtender Betone untersucht. Daher kommen nur Betone des Mehlkorntyps und keine Stabilisierer zum Einsatz.

5 Untersuchungen zur Mehlkornoptimierung

5.1 Allgemeines

Die experimentelle Ermittlung des Mindestwassergehalts für Sättigung ist bisher der erste Schritt zur Herstellung von SVB, siehe Abschnitt 3.1.2.2. Der Mindestwassergehalt alleine ist jedoch nur ein Teil der empirischen Optimierung. Neben dem Einfluss des Hohlraumgehalts des Kornhaufwerks (Abschnitt 3.3.3) muss in Abhängigkeit der ersten Hydrationsstufe (Abschnitt 3.3.4) und von der Wirkungsweise des gewählten Mehlkorn-Fließmittelsystems (Abschnitt 3.4) der tatsächlich optimale Wassergehalt in Mörtel- und Betonuntersuchungen gefunden werden. Zum einen muss der Wassergehalt reduziert werden, da durch

die Zugabe hochwirksamer Fließmittel die Agglomerat-Struktur aufgebrochen wird und gebundenes Wasser rheologisch wirksam wird. Auf der anderen Seite muss ausreichend Wasser zur Verfügung stehen, um die Anfangsreaktionen der Calciumaluminat-Phasen des Zements (Ettringitbildung) auszugleichen.

Im folgenden Abschnitt werden gezielt Modellleime aus unterschiedlichen Ausgangsmehlen, die sich in ihrer Kornform, Kornart, Feinheit und Reaktivität unterscheiden, zusammengesetzt. Damit wird ein weiterer Bereich von Kornzusammensetzungen abgedeckt. Es werden systematisch die Einflüsse auf den Mindestwassergehalt herausgearbeitet und Empfehlungen gegeben, wie aus vorgeprüften Parametern der Mehlkornhaufwerke der Startwassergehalt für die Betonoptimierung einfacher und verbessert abgeschätzt werden kann.

5.2 Art des Mehlkorns und der Mehlkorngemische

5.2.1 Verwendete mehlfeine Stoffe

Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurden drei Portlandzemente CEM I der Festigkeitsklasse 32,5 R und zwei Hochofenzemente CEM III/A der Festigkeitsklassen 32,5 N bzw. 32,5 R verwendet. Die Zemente sind in Tafel 5.2.1 zusammengestellt. Die Verwendung von Portlandkompositzementen wie CEM II/A-LL und CEM II/B-S erschien angesichts der hohen Zusatzstoffgehalte, wie sie bei selbstverdichtenden Betonen benötigt werden, als nicht sinnvoll.

Als Zusatzstoffe wurden Kalksteinmehl (inert) und Steinkohlenflugasche (puzolanisch) verwendet. Die Zusatzstoffe sind ebenfalls in Tafel 5.2.1 zusammengestellt. Die Kalksteinmehle wurden in unterschiedlichen Feinheiten und Korngrößenverteilungen eingesetzt. Die Kalksteinmehle KM1, KM2 und KM3 sind aus demselben Kalksteinvorkommen ermahlen worden und weisen eineregelmäßige, kubisch-gebrochene Struktur auf. Sie werden hauptsächlich in der Papier- und Farbenindustrie verwendet. Die Kalksteinmehle KM4 und KM5 sind Betonzusatzstoffe aus ähnlichen Kalksteinvorkommen mit fast identischer Zusammensetzung und Kornform. Bei den Flugaschen handelt es sich jeweils um handelsübliche Betonzusatzstoffe nach DIN EN 450 aus Steinkohlenverfeuerung mit typisch unregelmäßig-runder Kornform.

Für die Untersuchungen an Modellleimen aus inerten mehlfeinen Stoffen zur Ermittlung des Einflusses der Kornform wurden Glaskugeln mit nahezu ideal-runder Kornform verwendet.

Tafel 5.2.1: Verwendete reaktive und inerte mehlfeine Stoffe

Mehlkornart	Bezeichnung	Schlüsselnummer
reaktiv	Portlandzement CEM I 32,5 R	ZI.1
		ZI.2
		ZI.3
	Hochofenzement CEM III/A 32,5 N	ZIII.1
	Hochofenzement CEM III/A 32,5 R	ZIII.2
Inert	Kalksteinmehl	KM1
		KM2
		KM3
		KM4
		KM5
Weitgehend inert	Glaskugeln	GK1
Puzzolanisch	Steinkohlenflugasche	FA1
		FA2

5.2.2 Mehlkorngemische

5.2.2.1 Inerte und weitgehend inerte Mehlkorngemische

Die ersten Untersuchungen zur Ermittlung des Einflusses von Kornform und Korngrößenverteilung wurden an den Kalksteinmehlen, den Glaskugeln und an den Flugaschen durchgeführt. In den daraus mit Wasser hergestellten Leimsystemen sind diese mehlfeinen Stoffe über die Versuchsdauer als inert anzusehen. Dazu wurde drei Serien in den Kategorien ideal-gebrochenkörnig, ideal-gemischtkörnig und gemischtkörnig hergestellt, die im Folgenden beschrieben werden.

Für die Serie ideal-gebrochenkörnig wurden die drei Kalksteinmehle KM1, KM2 und KM3, für die Serie ideal-gemischtkörnig die Kalksteinmehle KM4, KM5 und die Glaskugeln GK1 sowie für die Serie gemischtkörnig die Kalksteinmehle KM4, KM5 und die Flugasche FA1 verwendet. Aus den drei Ausgangsmehlen wurden jeweils 12 Mischhaufwerke hergestellt. Die Anteile wurden volumetrisch zusammengesetzt. Die Zusammensetzungen mit den zugehörigen Bezeichnungen der geprüften Mehlkornhaufwerke sind in den Bildern 5.2.1 bis 5.2.3 dargestellt.

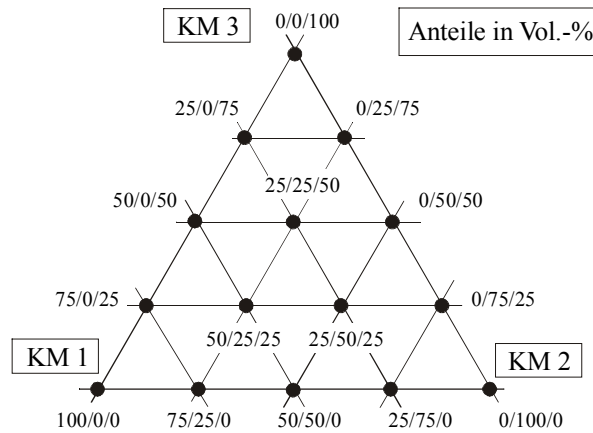


Bild 5.2.1: Zusammensetzungen und Bezeichnungen der Mehlkornhaufwerke aus inerten, gebrochenkörnigen Mehlkorntypen in Vol.-%

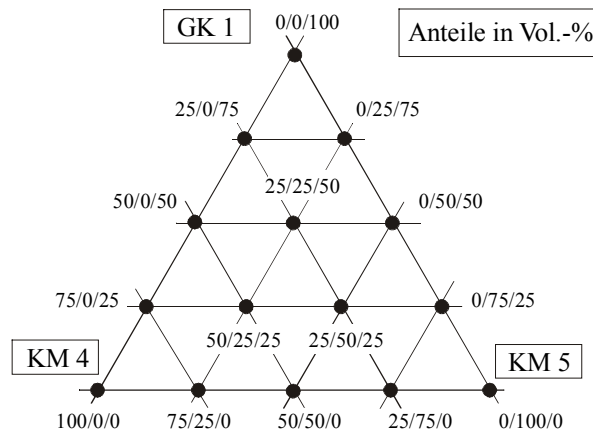


Bild 5.2.2: Zusammensetzungen und Bezeichnungen der Mehlkornhaufwerke aus inerten, gemischtkörnigen Mehlkorntypen in Vol.-%

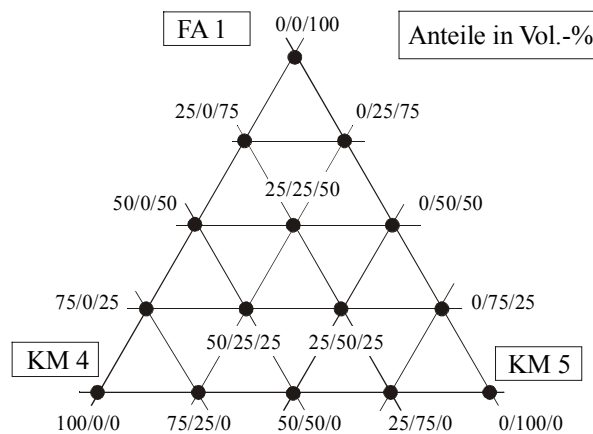
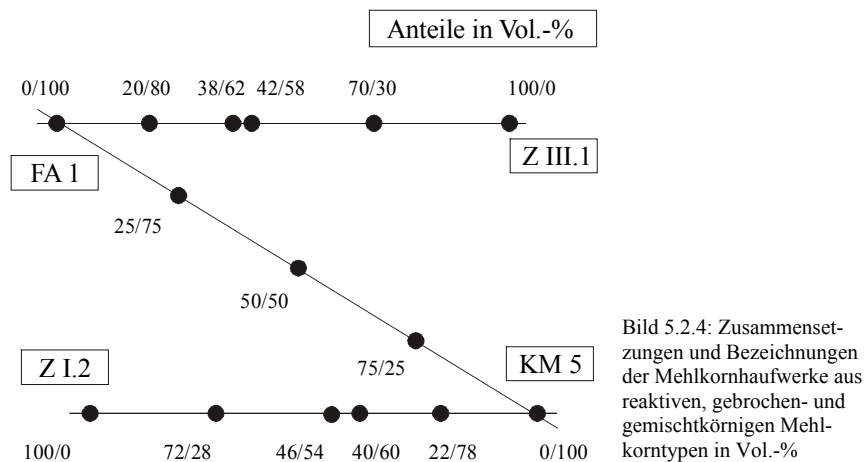


Bild 5.2.3: Zusammensetzungen und Bezeichnungen der Mehlkornhaufwerke aus weitgehend inerten, gemischtkörnigen Mehlkorntypen in Vol.-%

5.2.2.2 Reaktive Mehlkornmischungen

Die Untersuchungen zum Einfluss der Kornform und Korngrößenverteilung wurden im zweiten Schritt um reaktive Mehlkornhaufwerke erweitert. Es wurden zwei Serien in den Kategorien gebrochenkörnig-reaktiv und gemischtkörnig-reaktiv hergestellt. Die Serie gebrochenkörnig-reaktiv wurde mit dem Kalksteinmehl KM5 und dem Zement ZI.2 und die Serie gemischtkörnig-reaktiv mit der Flugasche FA1 und dem Zement ZIII.1 durchgeführt. Aus den zwei Aus-

gangsmehlen wurden jeweils vier Mischhaufwerke hergestellt. Die Anteile wurden volumetrisch zusammengesetzt. Die Zusammensetzungen mit den zugehörigen Bezeichnungen der geprüften Mehlkornhaufwerke sind in Bild 5.2.4 dargestellt.



5.3 Chemisch-mineralogische Charakterisierung der mehlfeinen Stoffe

Die chemische Zusammensetzung der Zemente sowie der inerten und reaktiven mehlfeinen Stoffe wurde mit der Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA), der Gehalt an Kohlenstoff und Wasser mit Kohlenwasserstoffautomaten ermittelt. Für die Portlandzemente wurden aus den Analysewerten die Klinkerphasen nach Bogue berechnet. An den Hochofenzementen wurde der Hüttensandgehalt mikroskopisch nach DIN EN 196-4 durch Auszählen ermittelt. Die Ergebnisse der chemischen Analysen an den Zementen sind in Tafel A.1, Anhang A, zusammengestellt. Zusätzlich wurde an den Kalksteinmehlen der Gehalt der tonigen Bestandteile mit der Methylenblau-Adsorption gemessen. Die Ergebnisse der chemischen Analysen an den inerten und reaktiven mehlfeinen Stoffen sind in Tafel A.2, Anhang A, dokumentiert. Die chemische Zusammensetzung der Glaskugeln wurde nicht untersucht. Tafel A.2, Anhang A, enthält Angaben des Herstellers zur Zusammensetzung der Glaskugeln.

5.4 Physikalische Charakterisierung der mehlfeinen Stoffe

Der Wasseranspruch, die Dichte und die spezifische Oberfläche nach Blaine der Zemente sowie der inerten und reaktiven mehlfeinen Stoffe wurden gemäß DIN EN 196 ermittelt. An den Zementen wurden zusätzlich das Erstarren, die Raumbeständigkeit und die Festigkeitsentwicklung gemäß DIN EN 196 geprüft. Die Ergebnisse dieser Prüfungen an den Zementen sind in Tafel A.3, Anhang A, an den inerten und reaktiven mehlfeinen Stoffen in Tafel A.4, Anhang A, aufgeführt. Die Korngrößenverteilungen aller Mehlkorntypen wurden mit dem Lasergranulometer ermittelt. Die beschreibenden Kenngrößen Lageparameter und Steigungsmaß der entsprechenden RRSB-Verteilungsfunktion werden ebenfalls im Weiteren getrennt dargestellt.

5.5 Granulometrische Charakterisierung der mehlfeinen Stoffe und Mehlkorngemische

5.5.1 Allgemeines

Um den Einfluss der Kornart, Kornform und Korngrößenverteilung der Feinstoffe auf den Hohlraumgehalt und auf die Verformbarkeit in wässriger Suspension zu erfassen, sind die mehlfeinen Stoffe und Mehlkorngemische auf den sich ergebenden Hohlraumgehalt und die rheologische Erscheinungsform mit den folgenden Prüfverfahren untersucht worden.

5.5.2 Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilungen der mehlfeinen Stoffe und Mehlkorngemische wurde mit dem Laserbeugungsspektrometer 1064 der Firma Cilas bestimmt.

Zur besseren Vergleichbarkeit aller Korngrößenverteilungen wurden die ermittelten Ergebnisse der mehlfeinen Stoffe und Mehlkorngemische an die RRSB-Verteilungsfunktion mit den beschreibenden Kenngrößen Lageparameter und Steigungsmaß angepasst, siehe Abschnitt 3.3.2.

5.5.3 Optische Charakterisierung

Um qualitative Informationen zur Kornform und Oberflächenbeschaffenheit der untersuchten Mehlkorntypen zu erhalten, wurden die mehlfeinen Stoffe und einige ausgewählte Mehlkorngemische im Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht. Dazu wurden von den mehlfeinen Stoffen Streupräparate angefer-

tigt, die anschließend mit einer rund 25 nm dicken Goldschicht besputtet wurden.

5.5.4 Wasseranspruch mit dem β_p -Wert-Verfahren

Der β_p -Wert (p für engl. „powder“) dient bei der Rezepturentwicklung für selbstverdichtenden Beton nach der Methode Okamura [Oka95] zur Bestimmung des Mindestwassergehaltes eines Mehlkorngemisches. Bei einem optimalen Wasser-Mehl Korn-Volumenverhältnis $V_w/V_p = \beta_p$ wird gerade das gesamte Wasser durch das Mehlkorn gebunden. Zur Ermittlung des β_p -Wertes werden Setzfließmaßversuche mit verschiedenen Wasser-Mehl Korn-Volumenverhältnissen durchgeführt, siehe Bild 5.5.1. Dabei bleiben die Mehlkornzusammensetzung und das Mehlkornvolumen konstant. Das Verfahren entspricht im Wesentlichen dem Ausbreitmaß-Versuch nach Haegermann. Die Leimprobe wird dabei jedoch nicht geschockt. Gemessen werden die Leimsetzfließmaße a_1 und a_2 nach Beendigung des Fließvorgangs. Das Leimsetzfließmaß wird dann in die relative Ausbreitfläche Γ umgerechnet, siehe Bild 5.5.1. Sie entspricht dem Faktor, um den sich die Grundfläche des Haegermann-Trichters vergrößert hat.

In einem Diagramm wird, wie in Bild 5.5.1 dargestellt, das jeweilige Wasser-Mehl Korn-Volumenverhältnis $(V_w/V_p)_i$ über der ermittelten relativen Ausbreitfläche Γ_i aufgetragen. Die Verbindungsgerade der einzelnen Werte liefert das Wasserrückhaltemaß β_p (Schnittpunkt mit der Ordinate) und den Deformationsfaktor E_p . Dabei ist β_p das Wasser-Mehl Korn-Volumenverhältnis, bei dem die Verformung des Leims Null ist und alle Hohlräume des Mehlkornhaufwerks mit Wasser gefüllt sind. Zur Auswertung und zur Bestimmung des β_p -Wertes sollten nur relative Ausbreitflächen herangezogen werden, die Werte größer 1 und kleiner 4 aufweisen.

Insgesamt ist zu beachten, dass der β_p -Wert durch lineare Extrapolation gewonnen wird. Das wirkliche Wasser-Feststoff-Volumenverhältnis für Hohlraumfüllung liegt jedoch unterhalb des β_p -Wertes, da die Kurve nicht linear verläuft. Daher kann das Wasser-Feststoff-Volumenverhältnis für Sättigung um bis zu 30 % vom β_p -Wert abweichen [Pun02]. Dieses Verfahren stellt jedoch baupraktisch eine sinnvolle Vereinfachung mit einer guten Reproduzierbarkeit dar, da der β_p -Wert als Näherung für den Startwassergehalt für die weitere experimentelle Optimierung herangezogen werden kann.

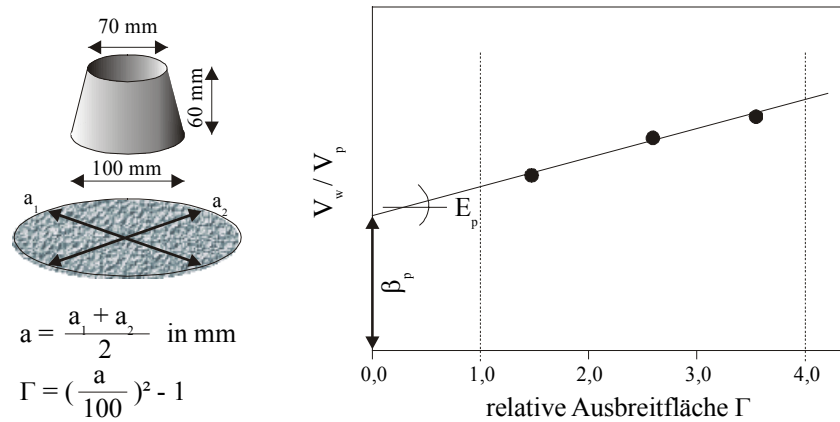


Bild 5.5.1: Ermittlung der relativen Ausbreitfläche Γ mit dem Leimfließtest (links) und Auswertung der Fließtests zur Bestimmung des β_p -Wertes (rechts)

5.5.5 Quecksilberdruckporosimetrie

Die Hohlraumgehalte der mehlfeinen Ausgangsstoffe sowie die daraus hergestellten Mehlkornhaufwerke wurden auch mit Hilfe der Quecksilberdruckporosimetrie bestimmt. Bei dem verwendeten Quecksilberdruckporosimeter handelt es sich um das Gerät „Porosimeter 2000 WS“ in Verbindung mit der „Macropore Unit 120“ der Firma Carlo Erba. Für die Messungen wurde ein spezielles Pulverdilatometer verwendet, das das Eindringen von mehlfeinen Stoffe in die Messkapillare verhindert. Zur Berechnung der Porositäten wurden der Randwinkel, den das Quecksilber mit dem Prüfgut bildet, mit $141,3^\circ$ und die Oberflächenspannung des Quecksilbers mit $0,48 \text{ N/m}$ angesetzt. Alle Prüfungen wurden bei 20° C durchgeführt. Die Auswertung erfolgte automatisch über einen an das Quecksilberdruckporosimeter angeschlossenen Rechner. Aus der Porenradienverteilung wurden zusätzlich der mittlere Porenradius, die spezifische Oberfläche sowie die Rein- und Rohdichte des Prüfgutes ermittelt.

Zum Vergleich der Hohlraumgehalte wurden der gemessene Porenraum in Vol.-% sowie der über den Quecksilberverbrauch bestimmte kumulative Hohlraumgehalt in mm^3/g verwendet. Eine Umrechnung aus dem gemessenen Porenraum in den Hohlraumgehalt nach der Gleichung

$$\varepsilon_{\text{Hg}} = \frac{100}{1 + \frac{V_f}{V_{\varepsilon, \text{Hg}}}} \quad \begin{array}{ll} \varepsilon_{\text{Hg}} & \text{Hohlraumgehalt in Vol.-%} \\ V_f & \text{Feststoffvolumen in mm}^3/\text{g} \\ V_{\varepsilon, \text{Hg}} & \text{Porenraum in mm}^3/\text{g} \end{array} \quad (5)$$

erschien angesichts der schwer zu bestimmenden Feststoffvolumina bei den Mehlkornmischungen als nicht zielführend.

5.5.6 Rotationsrheometer

Zur weiteren granulometrischen Beurteilung der Mehlkornhaufwerke und zur Ermittlung des Verhaltens von Kornart, Kornform und Korngrößenverteilung in Suspension wurden rheologische Messungen in einem Rotationsrheometer durchgeführt. Zur Anwendung kam das Baustoffrheometer Viskomat NT der Firma Schleibinger Geräte, siehe Bild 5.5.2. Im Gegensatz zu Viskosimetern, die unter weitgehender Einhaltung der notwendigen physikalischen Randbedingungen die rheologischen Parameter Fließgrenze τ_f in Pa und plastische Viskosität η in Pa·s ermitteln, lassen sich mit dem Rheometer die rheometrischen Kenngrößen Fließgrenze g in Nmm und plastische Viskosität h in Nmm·s bestimmen. Sie verhalten sich in guter Näherung proportional zu den rheologischen Kenngrößen, siehe Abschnitt 3.2.2.2.

Die zu untersuchende Suspension wurde in einem definierten Volumen in einen Probehälter gegeben. Nach dem Start der Messung wurde ein Messpaddel in den Probehälter eingetaucht, der gemäß des gewählten Messprofils zu rotieren begann. Es wurde das Widerstandsmoment T gemessen, das bei der jeweiligen Belastungsgeschwindigkeit N durch die Suspension auf das Messpaddel übertragen wird. Die Auswerteeinheit registriert Zeit, Drehmoment, Temperatur und Scherwiderstand. Das Gerät kann über die Belastungsgeschwindigkeit oder die Scherspannung gesteuert werden. Es lassen sich stufenlos Belastungsgeschwindigkeiten zwischen 0,001 und 200 Umdrehungen pro Minute (upm) einstellen. Der Bereich des messbaren Momentes liegt zwischen -200 und $+200$ Nmm. Weiterhin verfügt das Gerät über einen Kryostat, mit dem die Temperatur des Prüfgutes gesteuert werden kann.

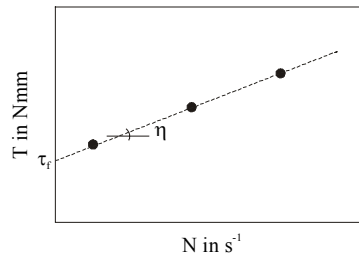
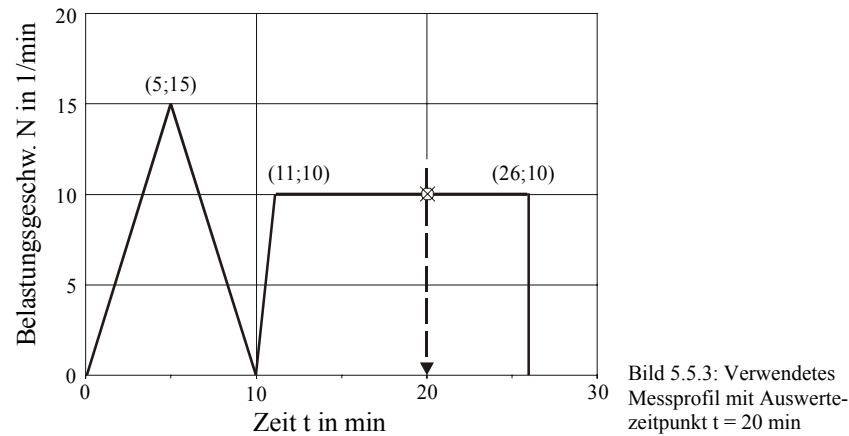


Bild 5.5.2: Verwendetes Rotationsrheometer und schematische Darstellung der Auswertung

Die Bestimmung der rheometrischen Kenngrößen erfolgte mit Hilfe des Bingham-Modells, siehe Abschnitt 3.2.2.2. Um den Einfluss der Thixotropie zu minimieren, wurden zur Auswertung die Messwerte aus dem Entlastungsbereich, d. h. der abnehmenden Belastungsgeschwindigkeiten, verwendet. Bei gleicher Mischreihenfolge und Vorbelastung der Leim- bzw. Mörtelproben können die gemessenen Scherwiderstände untereinander verglichen und aufgetragen werden.

Um Packungseffekte über den resultierenden Hohlraumgehalt von Mehlkornhaufwerken zu beschreiben, wurden die Mehlkornhaufwerke bei gleichem Wasser-Feststoff-Volumenverhältnis untersucht. Um auch die Suspensionen aus den mehlfeinen Stoffen mit höheren Feinheiten prüfen zu können, wurde das Wasser-Feststoff-Volumenverhältnis bei diesen Untersuchungen zu $V_w/V_p = 1,215$ gewählt. Bild 5.5.3 zeigt das verwendete Messprofil und den Auswertezeitpunkt.



5.6 Ergebnisse und Bewertung

5.6.1 Inerte und weitgehend inerte mehlfeine Stoffe und Mehlkornmischungen

5.6.1.1 Allgemeines

Die aus den Korngrößenverteilungen der Ausgangsmehle berechneten RRSB-Kenngrößen Steigungsmaß und Lageparameter, die ermittelten Wasser-Feststoff-Volumenverhältnisse V_w/V_p für β_p , der gemessene Porenraum und der über den Quecksilberverbrauch bestimmte kumulative Hohlraumgehalt sowie die indirekt über den Scherwiderstand ermittelten Hohlraumgehalte der Mehlkornhaufwerke der drei Serien sind in den Tafeln B.1 bis B.3, Anhang B, enthalten.

Zur Bewertung der Untersuchungen an den inerten, gebrochenkörnigen mehlfeinen Stoffen wurden die Ergebnisse der Prüfungen an den Kalksteinmehlen KM1 bis KM5 und daraus hergestellter Gemische zusammengefasst.

Zur Ermittlung des Einflusses der Kornform auf den Hohlraumgehalt wurden die Kalksteinmehle KM4 und KM5 gegen die Glaskugeln GK1 ausgetauscht. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich die Kalksteinmehl-Glaskugelmischungen in wässriger Suspension über die Prüfdauer inert verhalten. In der folgenden Bewertung wurden die Ergebnisse der Prüfungen an dem Glaskugelmehl und an den Gemischen mit 75 % Glaskugeln nicht berücksichtigt, da die resultierenden Lageparameter und Steigungsmaße im Vergleich zu Kornverteilungen von Flugaschen nicht relevant sind.

Zur baupraktischen Ermittlung des Einflusses der Kornform auf den Hohlraumgehalt wurden die Kalksteinmehle KM4 und KM5 gegen die Flugasche FA1 ausgetauscht. Die Kornform der Flugaschekörner ist meist kugelig. Wie bei allen Flugaschen üblich, finden sich aber auch offenporige Partikel wie aufgebrochene Flugaschekörner, Hohlkugeln und Koksreste sowie unregelmäßig geformte, nicht ganz aufgeschmolzene Quarzpartikel, siehe Abschnitt 5.6.1.2. Aufgrund dieser vielfältigen, unregelmäßigen Kornformen lassen sich Flugaschen nur schwer granulometrisch charakterisieren. Auch lassen sich spezifische Oberflächen als Maß für die Feinheit weder mit der Stickstoffadsorption (BET-Verfahren) noch über die spezifische Oberfläche nach Blaine bestimmen, da bei diesen Verfahren sowohl die äußeren als auch alle inneren zugänglichen Oberflächen erfasst werden. Aus demselben Grund können Hohlraumgehalte von flugaschehaltigen Kornhaufwerken mit zunehmendem Flugaschegehalt nur noch unzureichend ermittelt werden. Bei der Bestimmung des Hohlraumgehalts mittels Quecksilberdruckporosimetrie kann nicht ausgeschlossen werden, dass hohle Flugaschepartikel zerdrückt werden und sich dadurch die Struktur der Flugasche während der Prüfung verändert. Ebenso wie bei den Glaskugelmischungen kann davon ausgegangen werden, dass sich die Kalksteinmehl-Flugaschegemische in wässriger Suspension über die Prüfdauer inert verhalten. Daher kann bei der Bestimmung des Hohlraumgehalts über den β_p -Wert und der qualitativen Beschreibung der rheologischen Erscheinungsform im Rotationsrheometer ein Einfluss von Reaktionen auf das Messergebnis ausgeschlossen werden.

5.6.1.2 Optische Charakterisierung

Die Bilder 5.6.1 bis 5.6.3 zeigen die mehlfeinen Stoffe bei 2500-facher Vergrößerung unter dem Rasterelektronenmikroskop. Bild 5.6.1 zeigt die Kalksteinmehle KM1, KM2 und KM3. Sie weisen jeweils eine geschlossenporige und gedrungene, ideal-gebrochene Struktur auf.

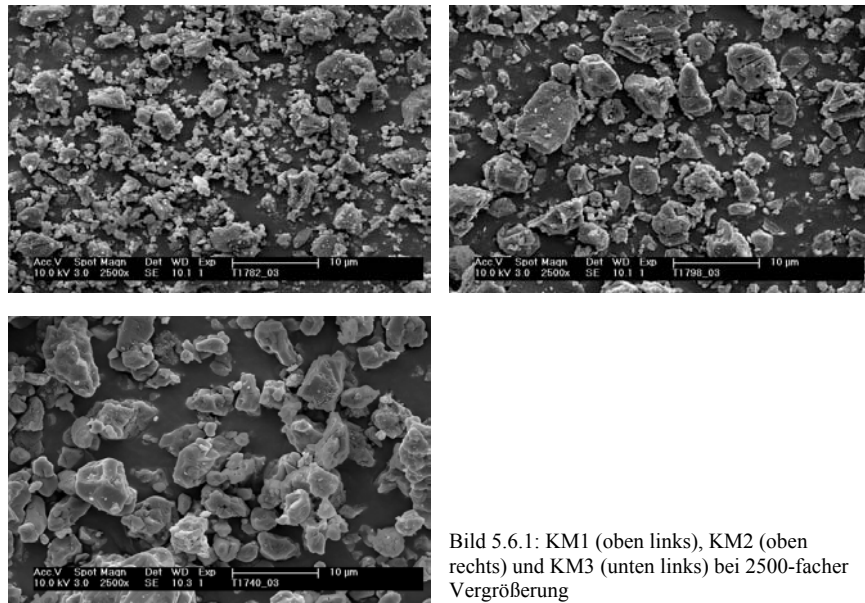


Bild 5.6.1: KM1 (oben links), KM2 (oben rechts) und KM3 (unten links) bei 2500-facher Vergrößerung

In Bild 5.6.2 sind die Kalksteinmehle KM4 und KM5 sowie die Glaskugeln GK1 bei 1000-facher Vergrößerung zu sehen. Wie auch die Kalksteinmehle KM1, KM2 und KM3 zeigen die Kalksteinmehle KM4 und KM5 eine gedrungene, ideal-gebrochene Kornform. Die Glaskugeln besitzen eine nahezu vollständige runde Kornform. Die beiden mehlfeinen Stoffe weisen ebenfalls eine geschlossenporige Struktur auf.

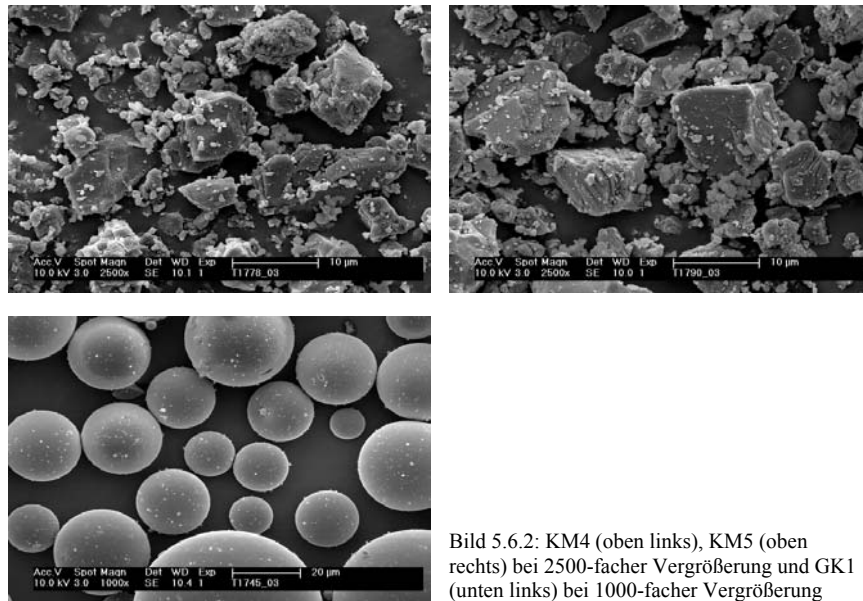


Bild 5.6.2: KM4 (oben links), KM5 (oben rechts) bei 2500-facher Vergrößerung und GK1 (unten links) bei 1000-facher Vergrößerung

Das Bild 5.6.3 zeigt die Flugasche FA1. Auf dem Bild ist gut die heterogene Erscheinungsform der Flugaschepartikel von gebrochenförmigen Koks- und Glasresten bis hin zu ideal-runden Flugaschekugeln zu erkennen.

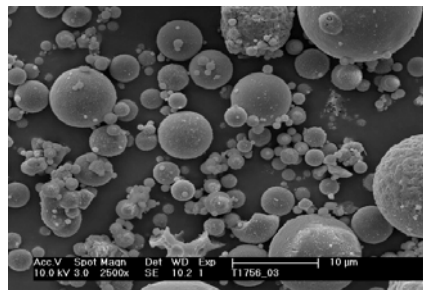


Bild 5.6.3: FA1 bei 2500-facher Vergrößerung

5.6.1.3 Sieblinien

Aus den gemessenen Sieblinien der Ausgangskalksteinmehle KM1 bis KM5 in der Serie ideal-gebrochenkörnig wurden die resultierenden Sieblinien der ent-

sprechenden Mehlkorngemische errechnet. Ein Vergleich der gemessenen Sieblinien mit den berechneten ergab in allen Fällen eine Übereinstimmung von mindestens 99 %. Dies war vor dem Hintergrund relativ gleicher Dichten und Kornformen zu erwarten.

Für die Kalksteinmehle KM4 und KM5 im Austausch mit den Glaskugeln GK1 in der Serie ideal-gemischtkörnig sowie der Flugasche FA1 in der Serie gemischtkörnig wurden ebenfalls die resultierenden Sieblinien der entsprechenden Mehlkorngemische aus den gemessenen Sieblinien errechnet. Hier ergab der Vergleich der gemessenen Sieblinien mit den berechneten eine Übereinstimmung von 97 %.

Zu beachten ist, dass im Gegensatz zu den gebrochenkörnigen Mehlkorntypen die im Lasergranulometer gemessenen Korngrößenverteilungen der Flugasche stärker schwanken. Dies liegt unter anderem an den unterschiedlichen Kornformen und an der glasigen Struktur. Bild 5.6.4 zeigt zwei Korngrößenverteilungskurven der Flugasche FA1 aus zwei Chargen, die zum einen in der Serie Kalksteinmehl-Flugasche und zum anderen in der Serie Hochofenzement-Flugasche gemessen wurden. Die ermittelten RRSB-Kenngrößen unterscheiden sich deshalb insbesondere im Steigungsmaß, siehe Tafeln B.3 und B.5, Anhang B.

Insgesamt ergab der Vergleich der Sieblinien, dass für jedes beliebige Gemisch aus den Ausgangsmehlen die beschreibenden Kenngrößen Lageparameter x' und Steigungsmaß n mit hinreichender Genauigkeit errechnet werden können.

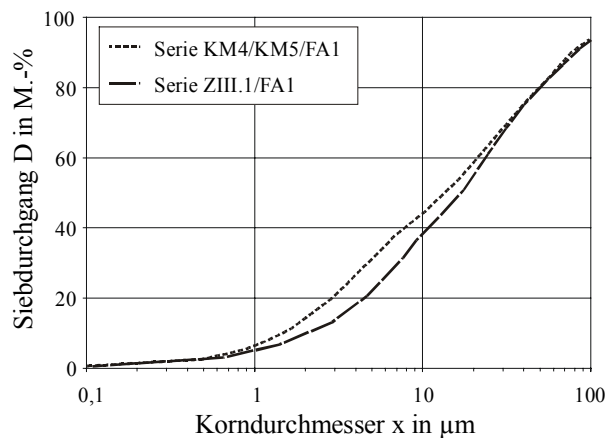


Bild 5.6.4: Korngrößenverteilung von FA1 in unterschiedlichen Serien

5.6.1.4 Einfluss der Kornverteilung auf den Hohlraumgehalt

Bild 5.6.5, in dem das Steigungsmaß n über dem Lageparameter x' dargestellt ist, gibt einen Überblick über die Bandbreite der Kornverteilungen der untersuchten Mehlkornmischungen. In Bild 5.6.6 ist der gemessene kumulative Hohlraumgehalt über dem Lageparameter aufgetragen. Daraus geht hervor, dass die Feinheit des Kornhaufwerks einen gewissen Einfluss auf die Porosität besitzt. Hauptsächlich ist jedoch der Hohlraumgehalt vom Steigungsmaß abhängig.

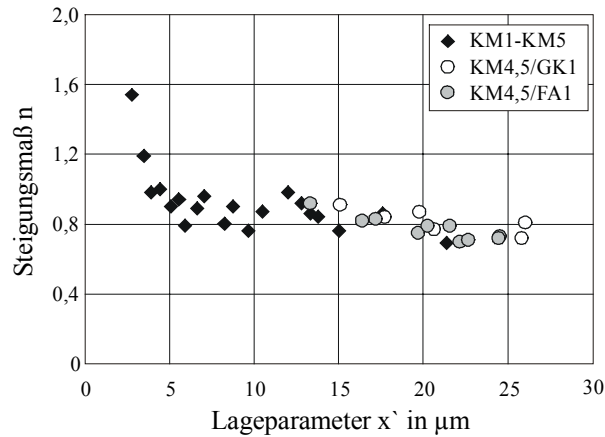


Bild 5.6.5: Bandbreite der Kornverteilungen

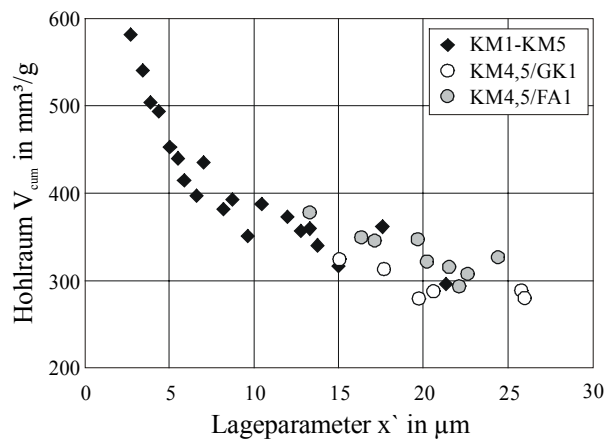


Bild 5.6.6: Abhängigkeit des Hohlraumgehalts vom Lageparameter

Bild 5.6.7 zeigt den Einfluss des Steigungsmaßes auf den Hohlraumgehalt. Darin ist zu erkennen, dass die glaskugelhaltigen Gemische bei annähernd gleicher Kornverteilungsbreite durchweg einen geringeren Hohlraumgehalt aufweisen als reine gebrochenkörnige Mehlkornhaufwerke. Die Kalksteinmehl-Flugaschegemische reihen sich zwischen die rein gebrochenkörnigen Kornhaufwerke ein.

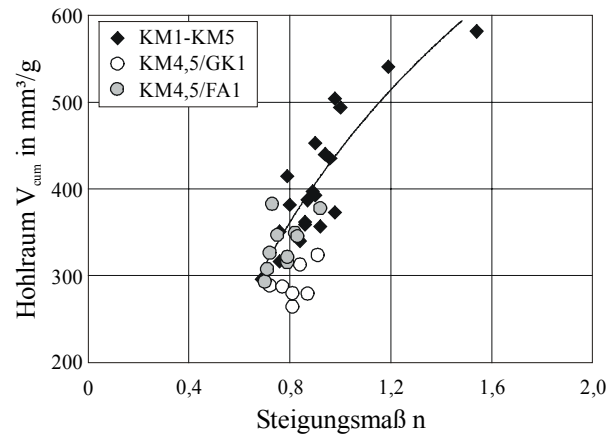


Bild 5.6.7: Kumulativer Hohlraum in Abhängigkeit vom Steigungsmaß der Kornverteilung

5.6.1.5 Einfluss des Hohlraumgehalts auf den Wasseranspruch und die Suspensionseigenschaften

Der Wasseranspruch nach dem β_p -Wert-Verfahren entspricht in guter Näherung dem Sättigungswassergehalt eines Mehlkornhaufwerks und ist von dessen Hohlraumgehalt abhängig. Hinzu kommt ein Anteil, der von der Reaktivität des Mehlkorns bestimmt wird. In Bild 5.6.8 ist der Zusammenhang zwischen dem kumulativen Hohlraumgehalt und dem für die Hohlraumfüllung benötigten Wasser-Feststoff-Volumenverhältnis nach dem β_p -Wert-Verfahren dargestellt. Da bei den vorliegenden Mehlkornmischungen in wässriger Suspension keine chemischen Reaktionen zu erwarten sind, sind das Wasser-Feststoff-Volumenverhältnis für Sättigung und der Scherwiderstand primär vom Hohlraumgehalt der Mehlkornhaufwerke abhängig.

Die inerten Kalksteinmehl- und Glaskugelgemische sind zudem geschlossenporig, so dass nur der Einfluss des Hohlraumgehalts der Kornverteilung enthalten ist. Ferner ist die Kornform der Kalksteinmehle in allen Fällen ähnlich der des doppelt-gebrochenen Edelsplitts „ideal-gebrochen“, d. h. es finden sich kaum

plattige Körner, und die der Glaskugeln ideal-rund. Es besteht also eine direkte Abhängigkeit des Wassergehalts für Sättigung β_p vom Hohlraumgehalt.

Im Gegensatz dazu lässt sich bei den flugaschehaltigen Mehlkornhaufwerken keine Abhängigkeit erkennen. Bemerkenswert an den Ergebnissen der Prüfungen an den flugaschehaltigen Mehlkornmischungen ist, dass mit zunehmendem Flugaschegehalt sich zwar der Wasseranspruch für Sättigung verringert, aber der kumulative Hohlraumgehalt ansteigt. Dieses physikalisch widersprüchliche Verhalten ist auf die variierende Kornform der Flugasche und auf die wahrscheinlichen Veränderungen der Flugaschestruktur während der Ermittlung des Hohlraumgehalts mittels Quecksilberdruckporosimetrie zurückzuführen.

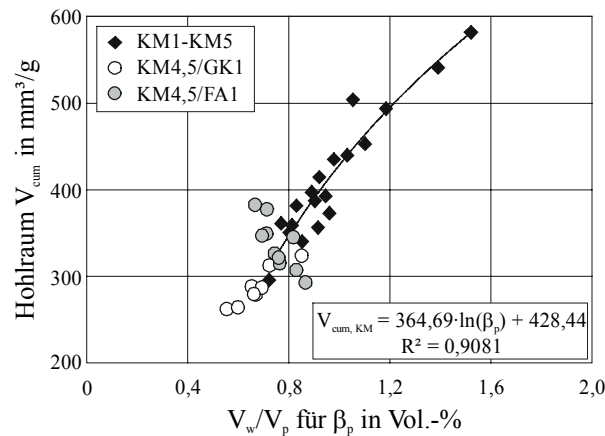


Bild 5.6.8: Kumulativer Hohlraum in Abhängigkeit vom Wasseranspruch nach dem β_p -Wert-Verfahren

Bild 5.6.9 zeigt den Einfluss der kumulativen Hohlraumvolumina der untersuchten Mehlkornhaufwerke auf die Scherwiderstände daraus hergestellter Suspensionen. Das Wasser-Feststoff-Volumenverhältnis der Suspensionen betrug jeweils 1,215. Zur indirekten Ermittlung der Hohlraumgehalte im Viskomat ist anzumerken, dass aufgrund des niedrigen Wasseranspruchs der Glaskugeln und der Flugaschen im Vergleich zu den Kalksteinmehlen die Suspensionen mit hohen Glaskugel- und Flugaschegehalten unter den gewählten Randbedingungen des Wasser-Feststoff-Volumenverhältnisses von $V_w/V_p = 1,215$ bei einer Belastungsgeschwindigkeit von $N = 10$ Umdrehungen pro Minute zum Absetzen neigten. Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse und um diesen Effekt weitgehend auszuschließen, wurde daher der Auswertzeitpunkt zur Ermittlung der Scherwiderstände auf $t = 12$ Minuten vorverlegt, siehe Bild 5.5.3. Dies ist vor dem Hintergrund, dass sich der Scherwiderstand von Suspensionen aus

Kalksteinmehl, Kalksteinmehl-Glaskugel und Kalksteinmehl-Flugasche-Gemischen mit niedrigeren Glaskugel- und Flugaschegehalten über die Prüfdauer bei konstanter Belastungsgeschwindigkeit kaum verändert, akzeptabel.

Die Leime aus den Kalksteinmehlen und aus den Kalksteinmehl-Glaskugelmischungen mit einem geringen Hohlraumgehalt bzw. β_p -Wert wiesen geringere Scherwiderstände auf als die Leime, die mit den hohlraumreicheren Kornhaufwerken hergestellt wurden. Dagegen benötigten die hohlraumärmeren Leime weniger Wasser für die Hohlraumfüllung und besaßen daher mehr Wasser für die Verflüssigung. Der Zusammenhang zwischen Sättigungswassergehalt und Hohlraumvolumen, wie er aus Bild 5.6.8 hervorgeht, wird hierdurch bestätigt.

Die gute Abhängigkeit zwischen dem resultierenden Scherwiderstand und dem kumulativen Hohlraumvolumen ist ebenfalls auf die günstige, geschlossenporige Kornform und auf das inerte System zurückzuführen. Weiterhin ist der Einfluss der Kornform auf die Suspensionseigenschaften zu erkennen. So ist der Scherwiderstand der glaskugelhaltigen Gemische im Vergleich zu den Kalksteinmehlgemischen bei gleichem Hohlraumgehalt reduziert. Die Abhängigkeit zwischen dem resultierenden Scherwiderstand und dem kumulativen Hohlraumvolumen ist ebenfalls auf die günstige, geschlossenporige Kornform und auf das inerte Verhalten zurückzuführen.

Die flugaschehaltigen Zusammensetzungen hingegen zeigten hier ebenfalls ein gegenläufiges Verhalten zwischen Sättigungswassergehalt und Hohlraumvolumen. Wie aus Bild 5.6.9 hervorgeht, wiesen die Leime aus den Kalksteinmehl-Flugaschegemischen mit einem höheren Hohlraumgehalt analog zum Wasser-Feststoff-Volumenverhältnis für Sättigung geringere Scherwiderstände auf. Weiterhin ist der Einfluss der Kornform auf die Suspensionseigenschaften zu erkennen. So ist der Scherwiderstand der flugaschehaltigen Gemische im Vergleich zu den Kalksteinmehl- und Glaskugelmischungen bei gleichem Hohlraumgehalt geringer. Werden hingegen die Wasser-Feststoff-Volumenverhältnisse für Sättigung wie in Bild 5.6.10 über dem resultierenden Scherwiderstand aufgetragen, findet sich das erwartete Verhalten, dass mit Abnahme des β_p -Wertes bei konstanter Wasserdosierung der Scherwiderstand sinkt, auch für die flugaschehaltigen Korngemische wieder.

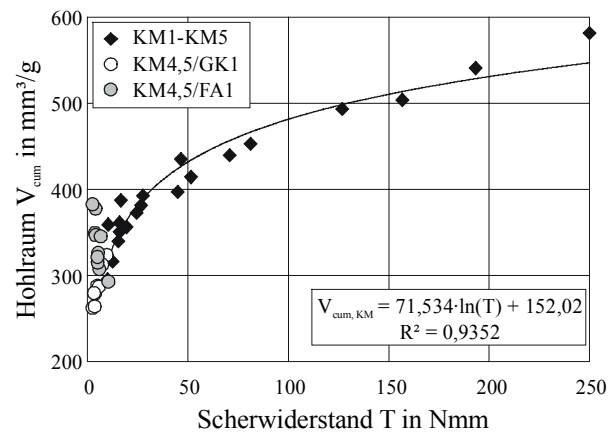


Bild 5.6.9: Kumulativer Hohlraum in Abhängigkeit vom Scherwiderstand

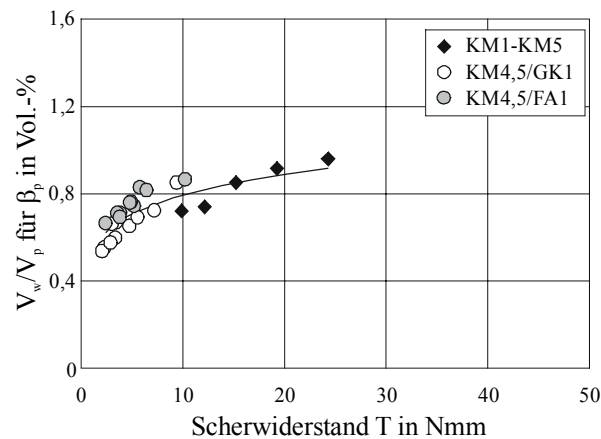


Bild 5.6.10: Wasseranspruch nach dem β_p -Wert-Verfahren in Abhängigkeit vom Scherwiderstand

5.6.1.6 Zusammenfassung

Ein Vergleich der gemessenen und der aus den Ausgangsmehlen berechneten Kornverteilungen ergab eine Übereinstimmung von mindestens 97 %. Dies erlaubt, aus den Ausgangskornverteilungen die granulometrischen Kenngrößen Lageparameter x' und Steigungsmaß n für daraus hergestellte Gemische zu errechnen.

Es konnte der Zusammenhang zwischen Kornverteilung und Hohlraumgehalt sowie im Besonderen zwischen dem baupraktisch relevanten Wasseranspruch

nach dem β_p -Wert-Verfahren und dem Hohlraumgehalt dargestellt werden. Der Einfluss des Hohlraumgehalts auf das Verhalten daraus hergestellter Suspensionen zeigte sich im gleichen Maße in den rheometrischen Untersuchungen und konnte indirekt über den resultierenden Scherwiderstand ermittelt werden. Mit Zunahme des Hohlraumvolumens des Mehlkornhaufwerks wurde mehr Wasser für die Hohlraumfüllung benötigt und stand somit nicht für die weitere Verflüssigung zur Verfügung. Daher stieg auch der Scherwiderstand mit zunehmenden Hohlraumgehalt. Auf der anderen Seite wurde der Scherwiderstand mit zunehmendem Anteil runder Körner im Vergleich zu den gebrochenkörnigen Mischhaufwerken bei gleichem Hohlraumgehalt reduziert. Die vielseitige Erscheinungsform der Flugasche erschwerte ihre granulometrische Charakterisierung. Insbesondere konnte das Haufwerksvolumen der flugaschehaltigen Mehlkornhaufwerke mit steigendem Flugascheanteil mit allen durchgeführten Verfahren nur schwer ermittelt werden, da auch alle zugänglichen „inneren Hohlräume“ erfasst wurden. Die Quecksilberdruckporosimetrie war nicht geeignet, das Haufwerksvolumen von flugaschehaltigen Mehlkornhaufwerken zu bestimmen, da nicht ausgeschlossen werden konnte, dass sich die Struktur der Flugaschekörner während der Prüfung verändert. Die Quantifizierung des Hohlraumgehalts flugaschehaltiger Mehlkornhaufwerke konnte lediglich durch die Ermittlung des Wasser-Feststoff-Volumenverhältnisses für Sättigung mit dem β_p -Wert-Verfahren und indirekt über den Scherwiderstand bei konstanter Wasserdosierung hinreichend genau erfolgen.

Das Bild 5.6.11 zeigt zusammenfassend den Einfluss des Steigungsmaßes auf den Wasseranspruch nach dem β_p -Wert-Verfahren. In hinreichender Näherung kann der Wert des Wasser-Feststoff-Volumenverhältnisses für Sättigung bei den gebrochenkörnigen Gemischen entsprechend der im Bild angegebenen Gleichung aus dem Steigungsmaß berechnet werden. Mit zunehmendem Anteil kugeligter Körner ist dieser Wert dann zu reduzieren. Für Flugaschen beträgt dieser Faktor je nach Flugaschegehalt bis zu 20 %.

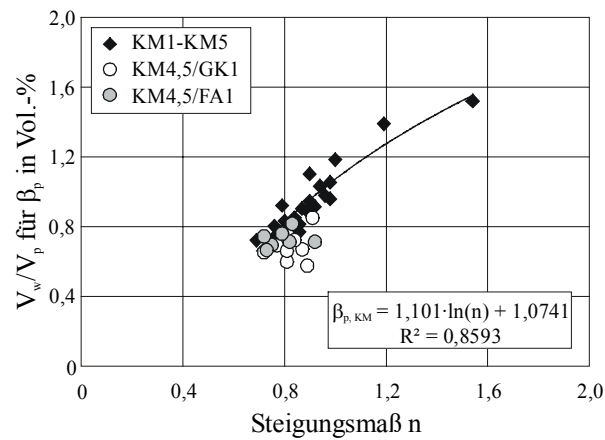


Bild 5.6.11: Wasseranspruch nach dem β_p -Wert-Verfahren in Abhängigkeit vom Steigungsmaß

5.6.2 Reaktive mehlfeine Stoffe und Mehlkorngemische

5.6.2.1 Allgemeines

Die aus den Korngrößenverteilungen berechneten RRSB-Kenngrößen Steigungsmaß und Lageparameter, die ermittelten Wasser-Feststoff-Volumenverhältnisse V_w/V_p für β_p , der gemessene Porenraum und der über den Quecksilberverbrauch bestimmte kumulative Hohlraumgehalt sowie die indirekt über den Scherwiderstand ermittelten Hohlraumgehalte der Mehlkornhauferwerke aus den gebrochenkörnig-reaktiven Mehlkorntypen ZI.2/KM5 sind in Tafel B.4 und die aus den gemischtkörnig-reaktiven Mehlkorntypen ZIII.1/FA1 sind in Tafel B.5, jeweils im Anhang B, enthalten.

Zur Bewertung der Untersuchungen an den reaktiven mehlfeinen Stoffen, sowohl der gebrochenkörnigen als auch der gemischtkörnigen, wurden die Ergebnisse mit den Ergebnissen an den mehlfeinen Stoffen aus Abschnitt 5.6.1 zusammengefasst. Dadurch kann der Einfluss der Kornform und der Reaktivität besser dargestellt werden.

5.6.2.2 Optische Charakterisierung

Bild 5.6.12 zeigt den Portlandzement ZI.2 bei 2500-facher Vergrößerung. Die Kornform entspricht der der Kalksteinmehle und ist ebenfalls kubisch gebrochen. Das Bild 5.6.13 zeigt den Hochofenzement ZIII.1 ebenfalls bei 2500-facher Vergrößerung. Darauf sind gut die scharfkantigen, zum Teil porösen

Hüttensandkörner zu erkennen. Das Kalksteinmehl KM5 ist bereits in Bild 5.6.2 und die Flugasche FA1 in Bild 5.6.3 dargestellt.

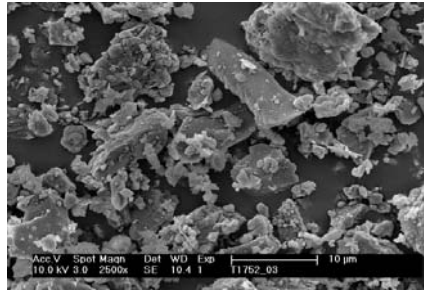


Bild 5.6.12: ZI.2 bei 2500-facher Vergrößerung

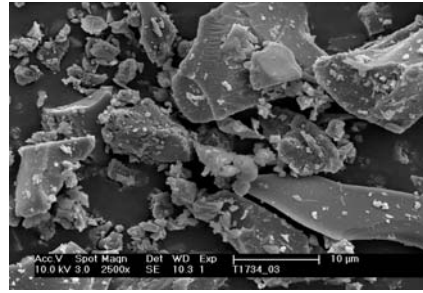


Bild 5.6.13: ZIII.1 bei 2500-facher Vergrößerung

5.6.2.3 Sieblinien

Aus den gemessenen Sieblinien der Ausgangsstoffe ZI.2 und KM5 sowie ZIII.1 und FA1 wurden die resultierenden Sieblinien der entsprechenden Mehlkornmische errechnet. Der Vergleich der gemessenen Sieblinien mit den berechneten ergab in allen Fällen eine Übereinstimmung von mindestens 98 %.

5.6.2.4 Einfluss der Kornverteilung auf den Hohlraumgehalt

Bild 5.6.14 zeigt die Bandbreite der Kornverteilungen der untersuchten mehlfeinen Stoffe. Dargestellt ist das Steigungsmaß n über dem Lageparameter x' . In Bild 5.6.15 ist der gemessene kumulative Hohlraumgehalt über dem Lageparameter aufgetragen. Ebenfalls gilt für die reaktiven Mehlkorntypen, dass die Feinheit des Kornhaufwerks einen gewissen Einfluss auf die Porosität besitzt. Hauptsächlich ist jedoch der Hohlraumgehalt vom Steigungsmaß abhängig, siehe Bild 5.6.16. Bei Gemischen mit hohen Flugaschegehalten von über 50 % sind die strukturbedingten Ungenauigkeiten bei der Bestimmung des kumulativen Hohlraumgehalts zu beachten.

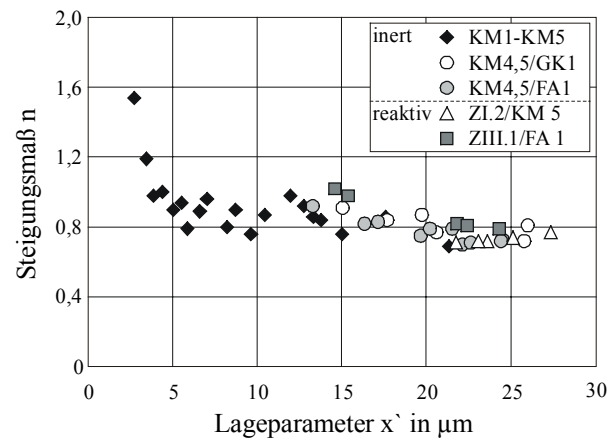


Bild 5.6.14: Bandbreite der Kornverteilungen

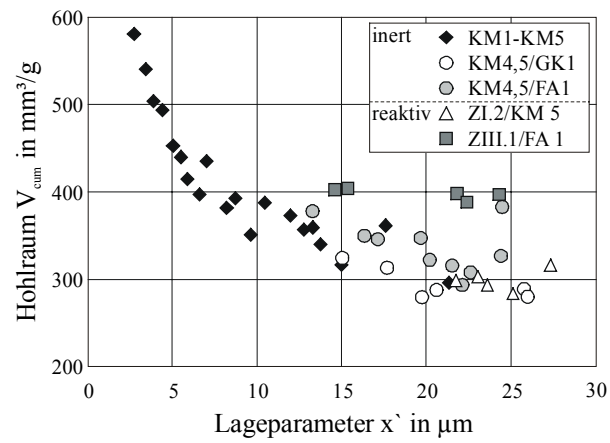


Bild 5.6.15: Abhängigkeit des Hohlraumgehalts vom Lageparameter

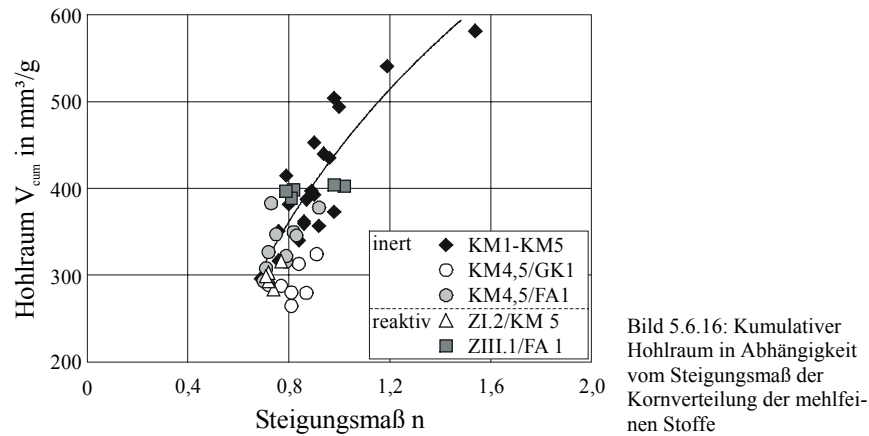


Bild 5.6.16: Kumulativer Hohlraum in Abhängigkeit vom Steigungsmaß der Kornverteilung der mehlfeinen Stoffe

5.6.2.5 Einfluss des Hohlraumgehalts auf den Wasseranspruch und die Suspensionseigenschaften

Bei den inerten, geschlossenporigen Mehlkornmischungen sind sowohl bei den gebrochenkörnigen Kalksteinmehlen als auch bei den gemischtkörnigen Kalksteinmehl-Glaskugelgemischen das Wasser-Feststoff-Volumenverhältnis für Sättigung und der Scherwiderstand primär vom Hohlraumgehalt abhängig. In Bild 5.6.17 ist die Abhängigkeit des Wasser-Feststoff-Volumenverhältnisses für Sättigung vom kumulativen Hohlraumgehalt für die inerten und reaktiven Mehlkornhaufwerke dargestellt. Darauf ist der Einfluss der Reaktivität der Zemente zu erkennen. Da die Ausgangsstoffe ZI.2 und KM5 in ihrer Kornform und Kornverteilung sehr ähnlich sind, veränderte sich der Hohlraum bei gegenseitigem Austausch kaum. Bei nahezu unverändertem Hohlraumgehalt stieg das Wasser-Feststoff-Volumenverhältnis für Sättigung nach dem β_p -Wert-Verfahren von 0,722 (KM5) auf 1,084 (ZI.2), siehe Tafel B.4, Anhang B. Diese Zunahme kennzeichnet den Wasserbedarf für die Anfangsreaktionen der Calciumaluminat-Phasen des Zements nach Wasserzugabe sowie den Einschluss von Wasser durch die Agglomeration der unterschiedlich geladenen Zementpartikel. Ebenso ist der Wasserbedarf für Sättigung von ZIII.1 größer, als es der kumulative Hohlraum erwarten ließe. Im Vergleich zu ZI.2 ist die Abweichung jedoch nicht so groß, da der Klinkeranteil von ZIII.1 nur 36 M.-% beträgt, siehe Tafel A.1, Anhang A, und der Hüttensand in diesem Stadium als inert betrachtet werden kann.

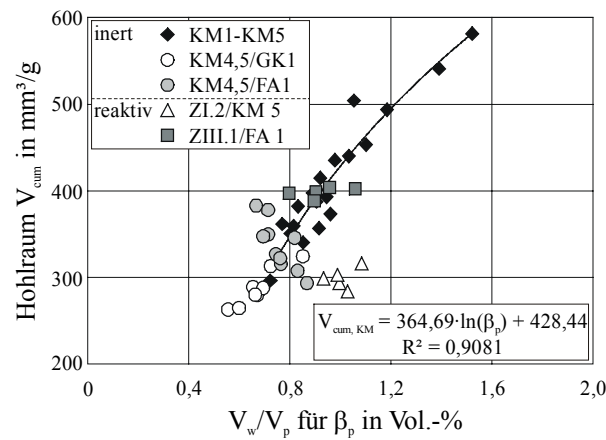
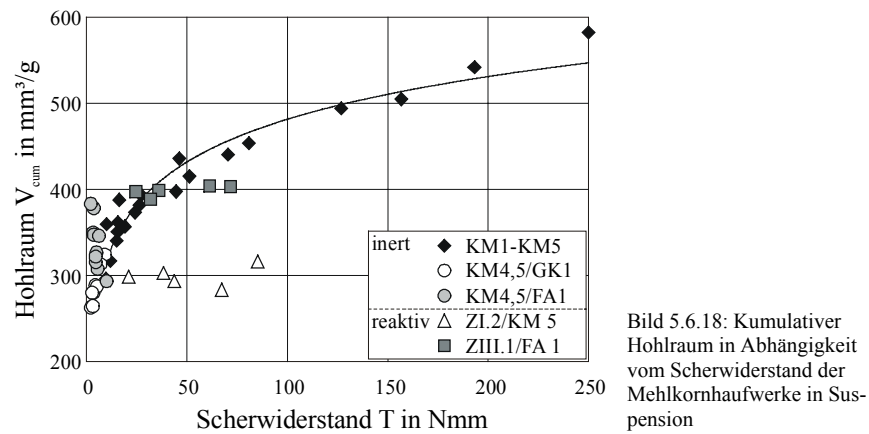


Bild 5.6.17: Kumulativer Hohlraum in Abhängigkeit vom Wasseranspruch nach dem β_p -Wert-Verfahren

Der Zusammenhang zwischen dem Hohlraumvolumen und dem Einfluss der Kornform sowie der Reaktivität auf die Suspensionseigenschaften lässt sich auch aus Bild 5.6.18 ableiten. Es zeigt den Einfluss der kumulativen Hohlraumvolumina der untersuchten Mehlkorngemische auf die Scherwiderstände daraus hergestellter Suspensionen. Obwohl die Hohlraumgehalte der Leime nahezu identisch waren, wiesen die zementhaltigen Kornhaufwerken (ZI.2–KM5 mit nahezu gleichen Hohlraumgehalten sowie ZIII.1) höhere Scherwiderstände auf als die Leime, die mit inerten Kornhaufwerken hergestellt wurden. Dieser Zusammenhang bestätigt die oben dargestellten Abweichungen des Wasseranspruchs für Sättigung bei gleichem Hohlraumgehalt mit zunehmender Reaktivität. Es ist ebenfalls darauf zurückzuführen, dass ein Teil des Wassers neben der Hohlraumfüllung auch für die Calciumaluminatreaktion benötigt wird und daher nicht für die Verflüssigung zur Verfügung steht.



5.6.2.6 Zusammenfassung

Ebenso wie in den vorherigen Serien geht aus den Untersuchungen an den reaktiven mehlfeinen Stoffen hervor, dass die die Kornverteilung beschreibenden Kenngrößen Lageparameter x' und Verteilungsbreite n für jede binäre Zusammensetzung aus den zwei Ausgangskornhaufwerken errechnet werden können.

Die Gemische aus dem Portlandzement ZI.2 und dem Kalksteinmehl KM5 zeigten eine gute Abhängigkeit zwischen dem Steigungsmaß n und dem kumulativen Hohlraumgehalt. Sie reihten sich in die Ergebnisse aus den Prüfungen an den reinen Kalksteinmehlgemischen ein, da diese Untersuchungen hauptsächlich von der Kornform abhängen und diese in beiden Fällen ideal-gebrochen und geschlossenporig war, siehe auch Bild 5.6.19. Die Gemische aus dem Hochofenzement ZIII.1 und der Flugasche FA1 streuten aufgrund der Probleme bei der Bestimmung des kumulativen Hohlraumgehalts flugaschehaltiger Kornhaufwerke mit zunehmendem Flugaschegehalt stärker. Dagegen reihte sich ZIII.1 in guter Näherung in die gebrochenkörnigen Mehlkornhaufwerke ein. Dabei ist zu beachten, dass die Hüttensandkörner nicht ideal-gebrochen sondern plattig und scharfkantig-gebrochen sind und mit einem Gehalt von 64 M.-% die größte Fraktion darstellen, siehe Bild 5.6.13. Insgesamt fällt es für die Kombination aus Hochofenzement und Flugasche schwerer, aus vorgeprüften Parametern Aussagen zum Wasseranspruch und zum Verhalten in Suspension zu treffen, da die granulometrische Erscheinungsform (kompakt-gebrochen, scharfkantig-plattig, geschlossen- und offenporig) zu vielseitig ist. Dies ist besonders gut im Bild 5.6.20 zu erkennen.

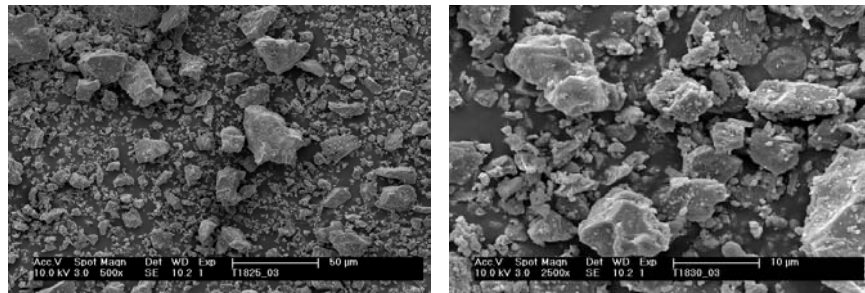


Bild 5.6.19: Gemisch aus Z I.2 (46 V.-%) und KM5 (54 V.-%) bei 500-facher Vergrößerung (links) und bei 2500-facher Vergrößerung (rechts)

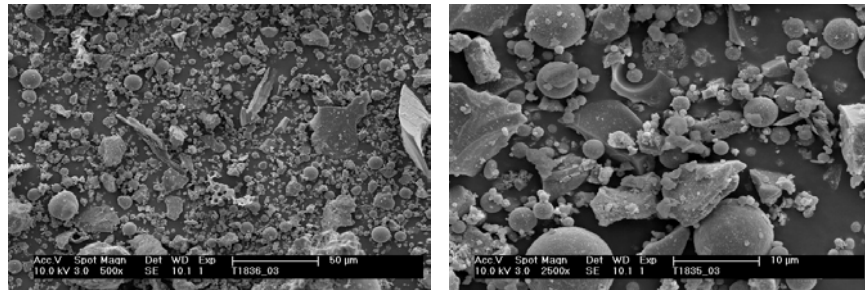


Bild 5.6.20: Gemisch aus Z III.1 (42 V.-%) und FA1 (58 V.-%) bei 500-facher Vergrößerung (links) und bei 2500-facher Vergrößerung (rechts)

Dadurch dass bei Austausch des Portlandzements ZI.2 durch das Kalksteinmehl KM5 sich der Hohlraumgehalt kaum veränderte, konnte in den Untersuchungen zum Einfluss des Hohlraumgehalts auf den Wasseranspruch und die Suspensionsseigenschaften mit zunehmendem Zementgehalt der Einfluss der ersten Lösungsreaktionen aufgezeigt werden. Aufgrund des reduzierten Klinkergehalts des Hochofenzements ZIII.1 war der Wasserbedarf für die Reaktionsprodukte nicht so hoch wie bei dem Einsatz von Portlandzementen. ZIII.1 verhielt sich in guter Näherung wie das Zement-Kalksteinmehlgemisch mit vergleichbarem Klinkeranteil (ZI.2/KM5 40/60).

Bild 5.6.21 zeigt zusammenfassend den Einfluss des Steigungsmaßes als Kriterium für den Hohlraumgehalt auf den Wasseranspruch des Kornhaufwerks nach dem β_p -Wert-Verfahren in Abhängigkeit von der Kornform und der Reaktivität.

Im Vergleich zu den Kalksteinmehlen, die aufgrund ihrer Struktur (inert, geschlossenporig, ideal-gebrochenkörnig) als Referenz-Haufwerke dienen, ist der aus dem Steigungsmaß berechnete Wert $\beta_{p,KM}$ bei den gebrochenkörnigen, reaktiven Gemischen mit zunehmendem Zementanteil um bis zu 20 % zu erhöhen. Dagegen ist $\beta_{p,KM}$ bei gemischtkörnigen, reaktiven Kornhaufwerken mit zunehmendem Anteil runder Kornform um bis zu 20 % zu reduzieren. Für die Kombination aus Hochofenzement ZIII.1 und Flugasche FA1 hebt sich der Einfluss der Reaktivität des Klinkers gegen den Einfluss der Kornform nahezu auf.

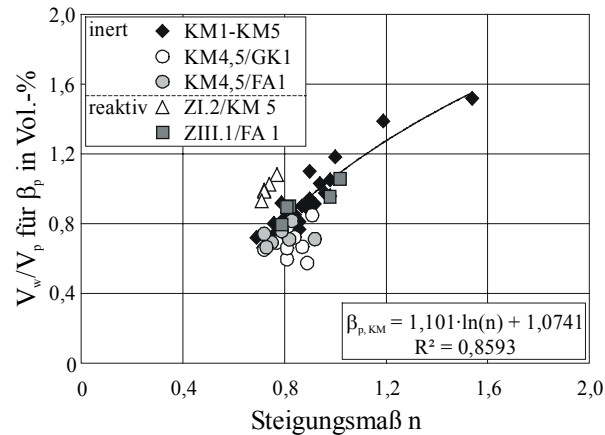


Bild 5.6.21: Wasseranspruch nach dem β_p -Wert-Verfahren in Abhängigkeit vom Steigungsmaß

5.7 Abschätzung des Startwassergehalts

Die experimentelle Ermittlung des Mindestwassergehalts über das Wasser-Feststoff-Volumenverhältnis für Sättigung β_p stellt nach der Methode Okamura den Ausgangswert für die empirische Rezepturentwicklung dar. Für die anschließende Betonoptimierung empfiehlt Okamura, bei Verwendung C_2S -reicher und C_3A -armer Zemente sowie Kalksteinmehl als Füller, den β_p -Wert um 10 bis 20 % zu vermindern [Oka95].

Werden hingegen herkömmliche Zemente und Zusatzstoffe verwendet, muss in Abhängigkeit von der Zusammensetzung und der Reaktivität des Mehlkorns sowie der Wirkungsweise des gewählten Fließmittels der Wassergehalt unter Berücksichtigung des gewünschten Verarbeitbarkeitsverlaufs reduziert oder auch erhöht werden, siehe Abschnitt 3.3.3.

Um den Startwassergehalt aus vorgeprüften granulometrischen Kenngrößen für die weitere Betonoptimierung abzuschätzen, wird im Rahmen dieser Arbeit folgende Vorgehensweise vorgeschlagen. Dazu wird der Startwassergehalt β_p^* analog zum β_p -Wert als volumenbezogenes Wasser-Feststoff-Volumenverhältnis eingeführt. Das aus den hier durchgeführten granulometrischen Untersuchungen abgeleitete Bild 5.7.1 kann zur Bestimmung von β_p^* verwendet werden. Dargestellt ist der Startwassergehalt β_p^* in Abhängigkeit vom Steigungsmaß des verwendeten Mehlkornhaufwerks.

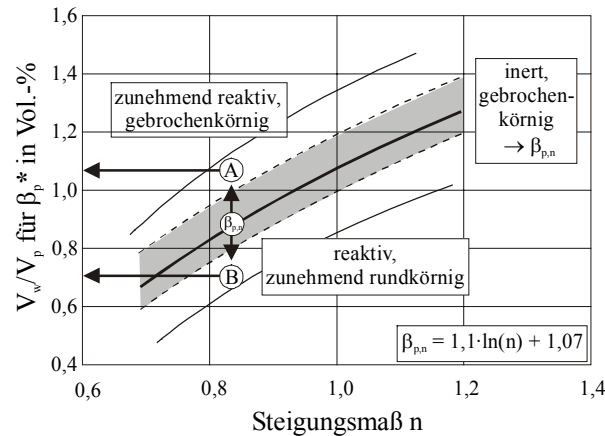


Bild 5.7.1: Diagramm zur Abschätzung des Startwassergehalts β_p^* für die weitere Betonoptimierung in Abhängigkeit des Steigungsmaßes sowie der Zusammensetzung des Mehlkorns

Im ersten Schritt ist der Wert $\beta_{p,n}$ über das Steigungsmaß des Kornhaufwerks mit der im Bild 5.7.1 angegebenen Gleichung zu berechnen. Man erhält den Grundwert für ein ideal-gebrochenkörniges Mehlkornhaufwerk. Je nach tatsächlicher Zusammensetzung des Mehlkornhaufwerks ist der Grundwert $\beta_{p,n}$ mit steigendem Klinkeranteil und somit erhöhter Reaktivität zu erhöhen, siehe Fall A in Bild 5.7.1, beziehungsweise mit steigendem Flugaschegehalt und zunehmend runder Kornform zu verringern, siehe Fall B in Bild 5.7.1. Der Startwassergehalt β_p^* für die weitere Betonoptimierung kann dann abgeschätzt werden. Die grau hinterlegte Fläche markiert den Kernbereich der sich in der Regel ergebenden optimalen Wassergehalte für die hauptsächlich verwendeten Mehlkornzusammensetzungen selbstverdichtender Betone bei einem Zement-Kalksteinmehl- bzw. Zement-Flugasche-Verhältnis von rund 50/50 Vol.-%.

6 Untersuchungen zur Verflüssigung zementhaltiger Suspensionen

6.1 Allgemeines

Nach der Ermittlung des Startwassergehalts für die Betonoptimierung können die Frischbetoneigenschaften durch Wasser und Fließmittel gesteuert werden. Der zeitliche Verlauf der Verarbeitbarkeit wird von den Wechselwirkungen des gewählten Mehlkorn-Fließmittelsystems sowie von der Temperatur beeinflusst. Um das Verflüssigungsverhalten schematisch abzubilden, wurden Untersuchungen an Zementleimen, Mörteln und Betonen durchgeführt.

Untersuchungen zur Wirkungsweise ausgewählter Fließmittel an Leim- und Mörtelsystemen im Abschnitt 6.2 dienten dazu, Fehlreaktionen mit den mehlfeinen Stoffen im Vorfeld zu vermeiden sowie Hinweise zur Dispergierbarkeit und Dispergierungszeit zu erhalten. Aufgrund der Vielzahl und der großen Variationsmöglichkeiten bei der Herstellung von Polycarboxylatethern konnten im Rahmen dieser Arbeit nur orientierende Prüfungen mit typischen Vertretern der neuen Fließmittel durchgeführt werden.

Die Verflüssigung selbstverdichtender Mörtel und Betone wurde durch Variation des Wasser- und Fließmittelgehalts in den Abschnitten 6.3 und 6.4 untersucht, um grundsätzliche Zusammenhänge zwischen der Zusammensetzung, den Verarbeitbarkeitseigenschaften und den Prüfgrößen abzuleiten.

Um die Kenntnisse über den Einfluss der Temperatur auf die Verflüssigung selbstverdichtender Mörtel und Betone zu erweitern, wurden Untersuchungen in unterschiedlichen Temperaturbereichen durchgeführt, siehe Abschnitt 6.5.

6.2 Wirkungsweise ausgewählter Fließmittel in Leim- und Mörtelsystemen

6.2.1 Allgemeines

Der Einfluss verschiedener betonverflüssigender Wirkstoffe auf das Ansteifverhalten rheologisch optimierter Mörtel wurde über Mörtelausbreitmaße nach Haegermann zu verschiedenen Zeitpunkten ermittelt. Um die Wirkungsweise der Zement-Fließmittelkombinationen in den Mörteln besser vergleichen zu können, wurden zwei Randbedingungen festgelegt: Zum einen wurde jedem Mörtel die gleiche Menge rheologisch wirksames Wasser für die Verflüssigung zur Verfügung gestellt. Zum anderen entsprach der Fließmittelgehalt im Mörtel der Sättigungsdosierung des zugehörigen Zementleimes.

6.2.2 Verwendete Fließmittel

Für die Untersuchungen zur Wirkungsweise der Polycarboxylatether wurden drei in ihrer Struktur unterschiedlich zusammengesetzte, handelsübliche Polycarboxylatether ausgewählt. Zusätzlich wurden zwei klassische, anionische Polykondensat-Fließmittel auf der Wirkstoffbasis von Natriumnaphthalinsulfonat und Natriummelaminsulfonat in die Untersuchungen einbezogen, um die Wirkungsweise der Polycarboxylatether mit bekannten Wirkungsmechanismen vergleichen zu können. Eine Übersicht der eingesetzten Fließmittel gibt Tafel 6.2.1.

Tafel 6.2.1: Übersicht der verwendeten Fließmittel

Schlüsselnummer	Wirkstoff	Hauptkette	Seitenkette
PCE 1	Polycarboxylatether	lang	Mittel
PCE 2	Polycarboxylatether	kurz	Lang
PCE 3	Polycarboxylatether	kurz	Kurz
NNS	Natriumnaphthalinsulfonat	-	-
NMS	Natriummelaminsulfonat	-	-

6.2.3 Physikalische Charakterisierung der Fließmittel

Zur physikalischen Charakterisierung der Fließmittel wurden jeweils der Feststoffgehalt durch Abdampfen, die Dichte, der pH-Wert und der Brechungsindex sowie die Oberflächenspannung bestimmt. Zusätzlich wurden die Infrarotspektren der Fließmittel ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tafel C.1, Anhang C, enthalten. Die Bilder C.1 bis C.5, Anhang C, zeigen die IR-Spektren der untersuchten Fließmittel.

6.2.4 Untersuchungen zum Sättigungsverhalten der Fließmittel in Zementleimen

Die maßgeblichen Einflussgrößen für das Zusammenwirken der Zemente und der Zusatzmittel sind vor allem der Gehalt an löslichem Alkalisulfat der Zemente sowie die Art und Struktur der Fließmittelmoleküle, siehe Abschnitt 3.4.

Die Wirkungsweisen der fünf ausgewählten Fließmittel wurden in Kombination mit folgenden drei Portlandzementen ZI.1, ZI.2 und ZI.3 ermittelt, siehe Abschnitt 5.2.1. Sie unterschieden sich hauptsächlich durch den Gehalt an Alkalien, siehe Tafel A.1, Anhang A. In erster Näherung wurde das Natriumäquivalent des Zements als Maß für den Gehalt an löslichem Alkalisulfat herangezogen.

Zur Beschreibung der Fließmittelstrukturen wurden Herstellerangaben verwendet. Um die Wirkung der Fließmittel besser untereinander vergleichen zu können, wurde die Annahme getroffen, dass der Wirkstoffgehalt des Fließmittels dem Feststoffgehalt entspricht, der gemäß DIN EN 480-8 durch Abdampfen bestimmt werden kann, siehe Tabelle C.1, Anhang C.

Um sicherzustellen, dass jedem Zementleim bzw. Mörtel die gleiche Menge rheologisch wirksames Wasser für die Verflüssigung zur Verfügung stand, richtete sich der Gesamtwassergehalt nach dem Wasseranspruch des jeweiligen Zements zur Erzielung der Normsteife nach DIN EN 196-3. Der Gesamtwassergehalt der Leime wurde dann aus dem Wasseranspruch des Zements plus 100 g Wasser pro 1000 g Zement bestimmt. Die zusätzliche Wassermenge von 100 g war notwendig, um eine ausreichende Verarbeitbarkeit zu erhalten. Der Gesamtwassergehalt war jedoch noch so niedrig, dass eine geeignete Menge Fließmittel zudosiert werden konnte und es nicht zu Sedimentationserscheinungen kam. Tafel 6.2.2 zeigt die Gesamtwassergehalte für die untersuchten Zemente.

Tafel 6.2.2: Gesamtwassergehalte der Leime in Abhängigkeit vom Zement

Schlüsselnummer	Wasseranspruch für Normsteife	Gesamtwassergehalt bezogen auf 1000 g Zement
	M.-% v. z	g
Z I.1	25,5	355
Z I.2	26,0	360
Z I.3	29,0	390

Der Wassergehalt des Fließmittels wurde auf den Gesamtwassergehalt angerechnet. Die Fließmittel wurden von der Nullmischung ohne Zusatzmittel in Schritten von 0,25 M.-% vom Zementgewicht (M.-% v. z) bis 2,0 M.-% v. z zu-

dosiert. Daher ergab sich der jeweilige Zugabewassergehalt unter Berücksichtigung des Fließmittels bei einem Zementgehalt von 1000 g zu:

$$w_{\text{Zugabe}} = \left[\frac{WA}{100} + 0,1 - \left(1 - \frac{FS}{100} \right) \cdot FM_i \right] \cdot 1000 \text{ in g}$$

mit WA Wasseranspruch des Zements für Normsteife in M.-% v. z
 FM_i Fließmittelgehalt für Dosierung i in M.-% v. z
 FS Feststoffgehalt des Fließmittels in M.-% v. FM

Die Sättigungsdosierung der Fließmittel wurde mit dem Rotationsrheometer bestimmt, siehe Abschnitt 5.5.6. Die Lagerung der Ausgangsstoffe sowie die Herstellung und die Prüfung der Leime erfolgte in einem klimatisierten Labor bei 20 °C. Zur Herstellung der Leime kam ein Mörtelmischer nach DIN EN 196-1 zum Einsatz. Tafel 6.2.3 zeigt die verwendete Mischreihenfolge.

Tafel 6.2.3: Verwendete Mischreihenfolge

Aktion	Zeit	Mischintensität
Wasserzugabe, dann mischen	30 s	Stufe I
Fließmittelzugabe, dann mischen	30 s	Stufe I
Mischunterbrechung: Leim mit Löffel durchstreifen, Wände abstreifen	30 s	-
Intensiv mischen	90 s	Stufe II

Während der Ermittlung des Sättigungspunktes im Rotationsrheometer wurde die Temperatur des Prüfgutes durch den Kryostat konstant bei 20 °C gehalten. Das verwendete Messprofil und der Auswertezeitpunkt sind in Bild 6.2.1 dargestellt.

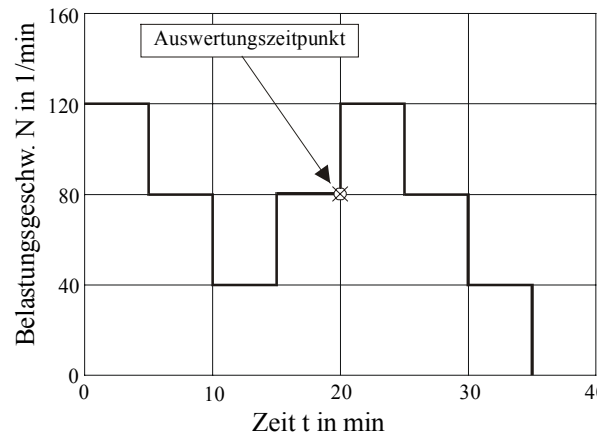


Bild 6.2.1: Verwendetes Messprofil und Auswertungszeitpunkt zur Bestimmung des Sättigungspunktes

Die im Rotationsrheometer ermittelten Sättigungsdosierungen der untersuchten Zement-Fließmittelkombinationen sind als Wirkstoffgehalt WS in M.-% bezogen auf das Zementgewicht in Tafel C.2, Anhang C, zusammengestellt.

6.2.5 Untersuchungen zum Ansteifverhalten von Mörteln in Abhängigkeit vom Fließmittel

Die Charakterisierung der Wirkungsweise der ausgewählten Fließmittelarten erfolgte über die Ermittlung der zeitabhängigen Mörtelausbreitmaße.

Die Leime der optimierten Mörtel waren entsprechend der Leime zur Bestimmung des Sättigungsverhaltens im Rotationsrheometer mit der Wirkstoffdosierung für Sättigung zusammengesetzt. Das Leimvolumen betrug für alle Mörtel $V_1 = 500$ ml. Als Gesteinskörnung wurde Viscocorder-Testsand in der Fraktion 0,08 bis 1,0 mm der Normensand GmbH, Beckum, eingesetzt. Die Zusammensetzungen der Mörtel sind in der Tafel C.3, Anhang C, enthalten.

Die Lagerung der Ausgangsstoffe sowie die Herstellung und die Prüfung der Leime erfolgte in einem klimatisierten Labor bei 20 °C. Es wurde die gleiche Mischreihenfolge wie unter 6.2.4 verwendet, jedoch vorher der Zement und der Sand auf Stufe I 20 Sekunden vorhomogenisiert. Das Mörtelausbreitmaß wurde unmittelbar nach Mischungsende, nach 5, 15, 30, 45, 60 Minuten und dann im Abstand von jeweils 30 Minuten ermittelt. Die Prüfung wurde abgebrochen, wenn ein Ausbreitmaß von rund 12 cm erreicht wurde. Damit an einer einzelnen Mörtelmischung nicht öfter als vier mal das Ausbreitmaß ermittelt wird, wurden

mindestens vier Mörtelproben hergestellt, die dann abwechselnd zu unterschiedlichen Prüfzeitpunkten verwendet wurden. Zwischen den Prüfungen wurden die Töpfe mit den Mörtelproben mit feuchten Tüchern abgedeckt.

Zur Ermittlung der Mörtelausbreitmaße wurde der Rütteltisch nach Haegermann gemäß DIN 1164 (Ausgabe 1958) mit Spiegelglasplatte verwendet. Der Mörtel wurde vor der Prüfung mit einem Löffel aufgerührt und beim Einfüllen in den Mörtelsetztrichter mit einem Stampfer leicht verdichtet. Die Mörtelausbreitmaße wurden nach 15 Schlägen mit einer Schieblehre in zwei Richtungen rechtwinkelig zueinander gemessen und auf 0,1 cm gerundet angegeben.

Die ermittelten Ausbreitmaße für die Anfangsverflüssigung sowie die Dauer der Verflüssigung für alle Zement-Fließmittelkombinationen sind in der Tafel C.4, Anhang C, angegeben.

6.2.6 Bewertung der Ergebnisse

6.2.6.1 Allgemeines

Die Eigenschaften der unterschiedlichen Zement-Fließmittelkombinationen wurden über die Kriterien Wirkstoffgehalt für Sättigung, Grad der Dispergierung am Sättigungspunkt, Anfangsverflüssigung des Mörtelsystems und Verflüssigungsdauer des Mörtels bewertet.

6.2.6.2 Einfluss des Fließmittels auf das Sättigungsverhalten von Zementleim

In Bild 6.2.2 sind die Wirkstoffgehalte für Sättigung über den Fließmitteln für die drei Zemente aufgetragen. Die Reihenfolge der Fließmittel ist frei gewählt. Die Verbindungslinien dienen nur der Orientierung und zur besseren Unterscheidung der drei Zemente.

Der Portlandzement ZI.1 mit einem niedrigen Natriumäquivalent von 0,56 M.-% zeigte in allen Fällen den geringsten Wirkstoffbedarf für Sättigung. ZI.3 mit einem hohen Natriumäquivalent von 1,17 M.-% hingegen benötigte stets die höchsten Wirkstoffgehalte, um die Sättigungsdosierung zu erreichen. ZI.2 mit einem mittleren Natriumäquivalent von 0,74 M.-% reihte sich zwischen ZI.1 und ZI.3 ein.

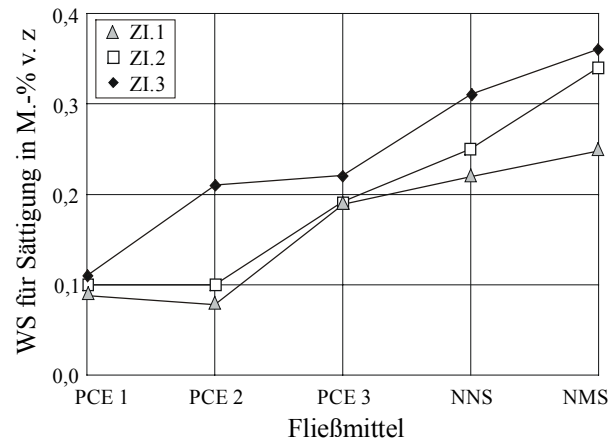


Bild 6.2.2: Wirkstoffgehalt für Sättigung aller Portlandzement Fließmittelkombinationen

Das Fließmittel PCE 1 verfügte mit der langen Hauptkette und den mittellangen Seitenketten über ein dichteres elektrostatisches Belegungspotential und sättigte mit der geringsten Wirkstoffmenge die ausgewählten Zemente nahezu in der gleichen Dosierung ab. Die Sättigungsdosierung mit PCE 3 war für alle Zemente ebenfalls nahezu gleich, hingegen wurde die doppelte Wirkstoffmenge im Vergleich zu PCE 1 benötigt. Dies kann vermutlich auf die kurze Hauptkette zurückgeführt werden, die ein geringeres Oberflächenbelegungspotential aufweist. PCE 2 zeigte mit den Portlandzementen ZI.1 und ZI.2 das gleiche Sättigungsverhalten wie PCE 1. Mit dem alkalireicheren Portlandzement ZI.3 wurde jedoch ein größerer Wirkstoffgehalt für Sättigung benötigt, der dem des Fließmittels PCE 3 entsprach. Die klassischen anionischen Fließmittel NNS und NMS zeigten mit allen Zementen das bekannte Sättigungsverhalten. Beide anionischen Fließmittel wirkten in Verbindung mit dem Portlandzement ZI.3 in geringen Dosierungen bis rund 0,1 M.-% v. z. als Brückenbildner. Eine Zugabe geringer Mengen verstärkte daher die Agglomeration der Zementpartikel in Suspension, so dass der Scherwiderstand sich kaum verringerte oder sogar leicht anstieg.

Bild 6.2.3 zeigt die Scherwiderstände am Sättigungspunkt der verschiedenen Zementleime in Abhängigkeit der untersuchten Fließmittel.

Der Portlandzement ZI.1 zeigte in allen Fällen den geringsten Scherwiderstand am Sättigungspunkt, ZI.3 den höchsten. ZI.2 reihte sich, abgesehen von der Kombination mit PCE 2, zwischen ZI.1 und ZI.3 ein. Aus dem Bild geht hervor,

dass der jeweilige Zement in Suspension von jedem Fließmittel ab der Wirkstoffdosierung für Sättigung nahezu im gleichen Maße dispergiert wurde.

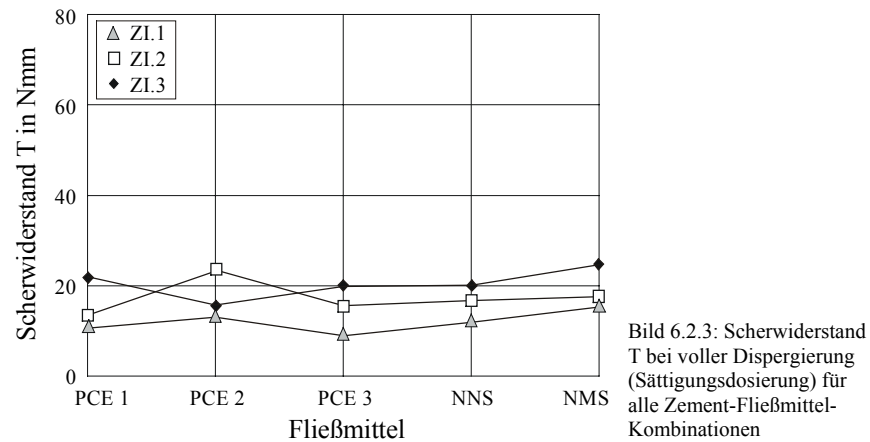
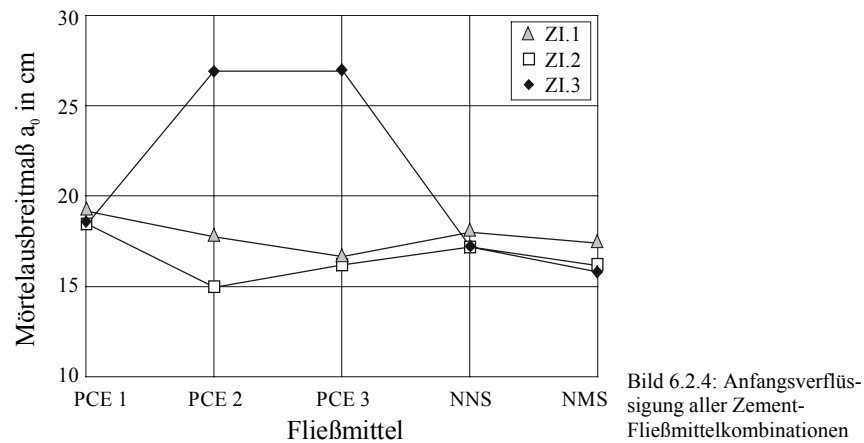


Bild 6.2.3: Scherwiderstand T bei voller Dispergierung (Sättigungsdosierung) für alle Zement-Fließmittel-Kombinationen

6.2.6.3 Einfluss des Fließmittels auf die zeitabhängige Verflüssigung von Mörtel

Zur Bewertung der zeitabhängigen Verflüssigungswirkung wurden das Mörtelausbreitmaß a_0 unmittelbar nach Mischungsende (Anfangsausbreitmaß) sowie der Prüfzeitpunkt, an dem der Mörtel nur noch ein Ausbreitmaß von rund 12 cm erreichte, zur Charakterisierung der Verflüssigungsdauer herangezogen.

In Bild 6.2.4 sind die Mörtelausbreitmaße a_0 in Abhängigkeit vom untersuchten Fließmittel aufgetragen. Die Anfangsausbreitmaße der Zement-Fließmittelkombinationen spiegeln das rheometrische Verhalten der Scherwiderstände am Sättigungspunkt. So zeigten die Mörtel aus den Leimen mit den niedrigsten Scherwiderständen (in der Reihenfolge ZI.1, ZI.2 und ZI.3) in der Regel ebenfalls die höchsten Ausbreitmaße. Die anionischen Fließmittel verflüssigten die Mörtel mit der Sättigungsdosierung unmittelbar nach Mischungsende in der gleichen Weise wie die Polycarboxylate. Als Ausnahmen sind die Kombinationen Z I.3-PCE 2 und Z I.3-PCE 3 zu nennen, die ein ausgeprägtes Verflüssigungsverhalten aufwiesen.



Das zeitabhängige Verflüssigungsverhalten ist in Bild 6.2.5 zu sehen. Der Vergleich der Erstarrungszeitpunkte nach DIN EN 196 der drei Portlandzemente (ZI.1 = 225 min, ZI.2 = 210 min, ZI.3 = 245 min, siehe Tafel A.3, Anhang A) lässt auf ein ähnliches Ansteifverhalten ohne Zusatzmittel schließen. Die Mörtel mit dem Zement ZI.1 zeigten in allen Fällen die geringste Verflüssigungsdauer, obwohl sie den geringsten Wirkstoffanspruch für Sättigung besaßen und das günstigste Dispergierverhalten sowohl im Rotationsrheometer als auch in der Anfangsverflüssigung aufwiesen. Eine ausreichend lange Verflüssigung konnte nur mit dem Fließmittel PCE 1 erzielt werden. Die Portlandzemente ZI.2 und ZI.3 zeigten ein gegenläufiges Verhalten. Die Mörtel mit ZI.3 konnten durch alle Polycarboxylate sehr lange verflüssigt werden. Im Gegensatz dazu war die Verflüssigungsdauer mit den anionischen Polykondensat-Fließmitteln deutlich geringer. Die Mörtel mit ZI.2 hingegen zeigten mit den anionischen Polykondensat-Fließmitteln ein ausgeprägtes Verflüssigungsverhalten, während die Verflüssigungsdauer in Verbindung mit den beiden Polycarboxylaten PCE 2 und PCE 3 (jeweils mit kurzer Hauptkette) weniger ausgeprägt war.

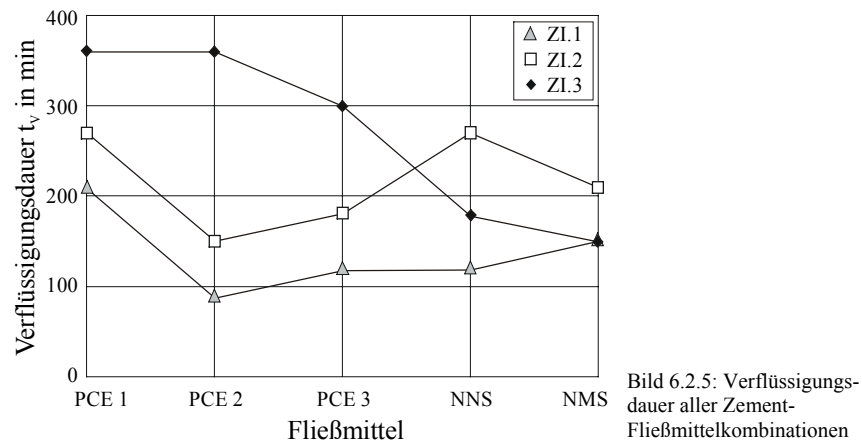


Bild 6.2.5: Verflüssigungsdauer aller Zement-Fließmittelkombinationen

6.2.7 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass alle Fließmittel die gewählten Zemente nahezu gleichmäßig und vollständig dispergieren konnten. Dabei konnte der Portlandzement ZI.1 mit dem geringen Natriumäquivalent in allen Fällen mit den geringsten Wirkstoffgehalten gesättigt und am besten dispergiert werden. Die Verflüssigungsdauer war aber nur mit dem Fließmittel PCE 1 mit langer Hauptkette und mittleren Seitenketten ausgeprägt.

Der Portlandzement ZI.2 mit dem mittleren Natriumäquivalent zeigte ein ähnliches Sättigungsverhalten wie ZI.1. Bei geringen Anfangsausbreitmaßen war die Verflüssigungsdauer durchschnittlich hoch. Insbesondere konnten überdurchschnittliche Verflüssigungszeiten mit den anionischen Polykondensat-Fließmitteln erzielt werden, die z. T. deutlich über den Verflüssigungszeiten mit den Polycarboxylaten mit den kürzeren Hauptketten lagen.

Der Portlandzement ZI.3 mit dem hohen Natriumäquivalent besaß den größten Wirkstoffbedarf für Sättigung. Während die Dispergierung, die Anfangsverflüssigung und die Verflüssigungsdauer mit den anionischen Polykondensat-Fließmitteln unterdurchschnittlich zu bewerten waren, zeigten die Polycarboxylatether ein ausgeprägtes Verflüssigungsverhalten.

6.3 Verflüssigung selbstverdichtender Mörtel

6.3.1 Übertragbarkeit von Mörtel- auf Betonprüfungen

Selbstverdichtende Betone des Mehlkorntyps sind leimreiche Betone. Sie bestehen nach Okamura zu 60 bis 70 Vol.-% aus Mörtel. Der Mörtel wiederum enthält rund 60 Vol.-% Leim, siehe Abschnitt 3.1.2.2. Die Zusammensetzung der Sieblinie, hier nur Rheinsand und -kies, schwankt in der Regel um die Regelsieblinie B nach DIN 1045-2. Die groben Gesteinskörnungsfractionen 4 bis 16 mm des Betons beeinflussen dabei hauptsächlich das Blockierverhalten. Sie haben aber in der Regel keinen großen Einfluss auf das Fließverhalten, da der Leimanspruch dieser Fraktionen im Vergleich zum Sand gering und untereinander ähnlich ist. Bild 6.3.1 zeigt die Regelsieblinien A 16, B 16 und C 16 sowie den Einfluss der einzelnen Korngruppen auf die nach DIN 66141 berechneten massenbezogenen Oberflächen $S_{m,cal}$ der Gesteinskörnungen. Es ist zu erkennen, dass die Korngruppen größer 4 mm dieser unterschiedlichen Verteilungen keinen nennenswerten Beitrag zur gesamten, durch Leim abzusättigenden Oberfläche leisten. Vor dem Hintergrund, dass die Sieblinien selbstverdichtender Betone sich in der Zusammensetzung an die Sieblinie B 16 anlehnen, ist der Einfluss kleinerer Variationen auf den zu füllenden Hohlraumgehalt ebenfalls zu vernachlässigen. Viele Verarbeitbarkeitseigenschaften lassen sich daher am Leim- bzw. Mörtelsystem charakterisieren und mit leichten Anpassungen auf den entsprechenden SVB übertragen.

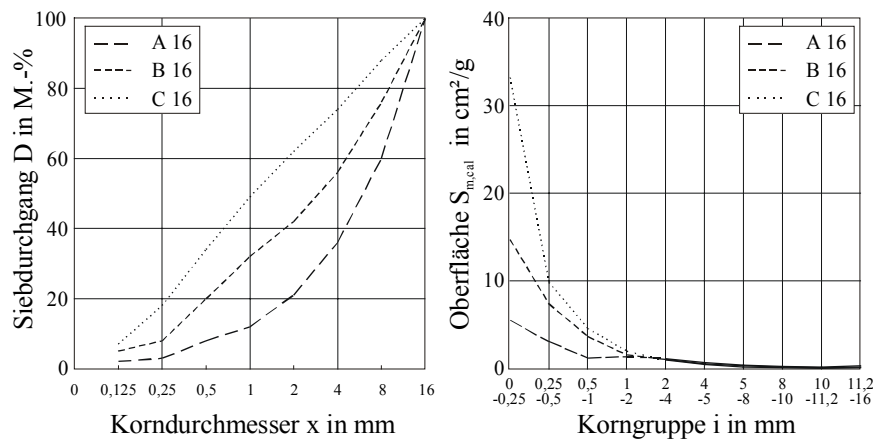
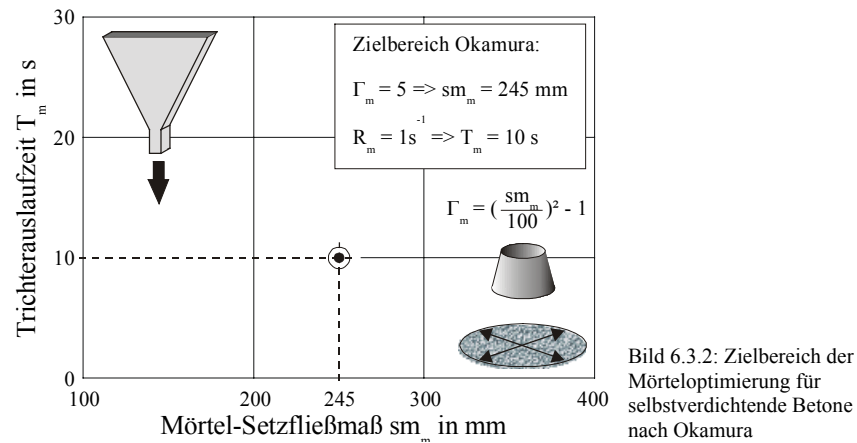


Bild 6.3.1: Sieblinien A, B und C 16 sowie Oberflächenbeitrag der einzelnen Korngruppen

Bei der herkömmlichen Rezepturentwicklung selbstverdichtender Betone wird ein bestimmtes Fließverhalten des Mörtels angestrebt, siehe Abschnitt 3.1.2.2

und Bild 6.3.2. Wenn durch Variation der Wasser- und Fließmittelzugabe dieser Wert erreicht ist, werden in Betonversuchen die Wasser- und Fließmittelgehalte angepasst, d. h. ebenfalls auf einen bestimmten Startwert eingestellt. Die Verflüssigungsdauer wird dann in der Regel alleine der Wirksamkeit des Fließmittels zugeschrieben.



Für die Verwendung von selbstverdichtendem Beton ist es von großer Bedeutung, die zeitabhängigen Verarbeitbarkeitseigenschaften zu kennen. Diese werden jedoch in entscheidendem Maße sowohl vom Fließmittel- als auch vom Wassergehalt bestimmt.

Um die Einflüsse der Wasser- und Fließmitteldosierung auf die Verarbeitbarkeitseigenschaften zu ermitteln, wurden in den Mörteluntersuchungen die Wasser- und Fließmittelgehalte variiert. Die Frischmörteleigenschaften wurden dann bis zum Verlust der Verarbeitbarkeit infolge von Stagnation untersucht. Daraus lassen sich sowohl das zeitabhängige Verhalten der Verarbeitbarkeit bestimmen als auch Korrekturmaßnahmen zur Wiederherstellung der geforderten Frischbetoneigenschaften ableiten.

6.3.2 Zusammensetzungen und Herstellung der Mörtel

Für die Untersuchungen wurden der Portlandzement ZI.2, das Kalksteinmehl KM5, Rheinsand der Fraktion 0/2, Trinkwasser aus dem Leitungsnetz der Stadt Düsseldorf und das Fließmittel PCE 2 verwendet.

Die Mörtel sind gemäß Okamura zusammengesetzt, d. h. das Leimvolumen beträgt rund 60 Vol.-% und das Gesteinskörnungsvolumen rund 40 Vol.-%. Das Größtkorn des Sandes wurde auf 2 mm begrenzt, um die Mörtel auch im Rotationsrheometer prüfen zu können.

Der optimale Wassergehalt wurde in Vorversuchen angepasst. Das ermittelte Wasser-Feststoff-Volumenverhältnis für Sättigung β_p betrug 0,987 (volumetrische Mehlkornzusammensetzung Z I.2/KM5 = 40/60, siehe Tafel B.4, Anhang B) und wurde im ersten Schritt um 10 % gemindert. Das aus dem Steigungsmaß errechnete Wasser-Feststoff-Volumenverhältnis für Sättigung $\beta_{p,n}$ betrug 0,71. Unter Berücksichtigung der Reaktivität konnte daraus der Startwert für die weitere Betonrezeptur β_p^* zu 0,84 abgeschätzt werden, siehe Abschnitt 5.7. Somit ergab sich nach dem β_p -Wert-Verfahren ein Wassergehalt von 171 l/m³ und nach dem β_p^* -Wert-Verfahren ein Wassergehalt von 162 l/m³. In der weiteren Optimierung wurde durch Variation des Wasser- und Fließmittelgehalts schließlich der optimaler Wassergehalt zu 173 l/m³ bestimmt.

Für die Mörteluntersuchungen zum Einfluss des Wassergehalts auf die selbstverdichtenden Eigenschaften wurde der Wassergehalt zum einen um 5 l/m³ auf 168 l/m³ abgesenkt und zum anderen um 8 l/m³ auf 181 l/m³ angehoben. Dies entspricht üblichen, in der Praxis anzutreffenden, Schwankungsbreiten. Die Zusammensetzungen der Mörtel sind in Tafel 6.3.1 dargestellt. Jeder Mörtel wurde mit vier verschiedenen Fließmittelgehalten hergestellt, so dass insgesamt 12 Mörtelvariationen untersucht wurden. Das Wasser der Fließmittel wurde auf den Gesamtwassergehalt angerechnet.

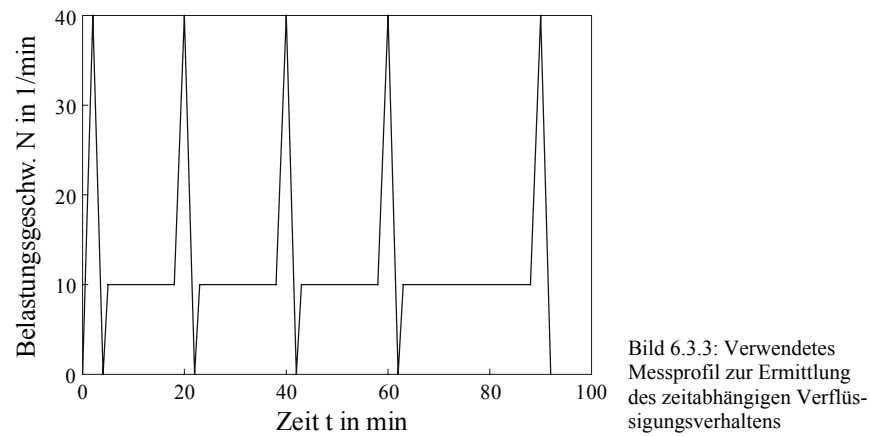
Die Lagerung der Ausgangsstoffe sowie die Herstellung der Mörtel erfolgte in einem klimatisierten Labor bei 20 °C. Zur Herstellung der Mörtel kam ein Mischer der Firma Rego mit Mischbesen zum Einsatz. Es wurde die gleiche Mischreihenfolge wie im Abschnitt 6.2.4 verwendet, jedoch vorher der Zement und der Sand bei geringer Umdrehungszahl vorhomogenisiert. Es wurden Mörtelchargen von jeweils vier Litern hergestellt. Zwischen den Prüfungen wurde der Mischtopf mit einem feuchten Tuch abgedeckt. Vor den jeweiligen Prüfungen wurde der Mörtel kurz aufgemischt.

Tafel 6.3.1: Zusammensetzung der selbstverdichtenden Mörtel

Schlüsselnummer		PK 168				PK 173				PK 181			
ZI.2	dm ³	0,481				0,479				0,475			
KM5	dm ³	0,713				0,710				0,705			
w	dm ³	1,044				1,070				1,112			
g 0/2	dm ³	1,669				1,649				1,615			
LP	Vol.-%	1,5				1,5				1,5			
PCE 2	M.-% v. z	0,7	0,8	0,9	1,0	0,7	0,8	0,9	1,0	0,7	0,8	0,9	1,0
Vges	dm ³	3,997				3,998				3,997			

6.3.3 Untersuchung der Verflüssigung im Rotationsrheometer

Der Einfluss des Wasser- und Fließmittelgehalts auf die Verflüssigung und Verarbeitbarkeitseigenschaften der Mörtel wurde über die zeitliche Veränderung der rheometrischen Kenngrößen Fließgrenze und Viskosität im Viskomat untersucht, siehe Abschnitt 5.5.6. Unmittelbar nach Mischungsende wurde eine Mörtelprobe entnommen und in den Probenbehälter des Rotationsrheometers eingebaut. Rund 2 Minuten nach Mischungsende wurde die Messung gestartet. Bild 6.3.3 zeigt das verwendete Messprofil. Durch das Steigern und das Absenken der Belastungsgeschwindigkeiten konnten für die Mörtel Fließkurven zu den Prüfzeitpunkten 0, 20, 40, 60 und 90 Minuten nach Start der Messung ermittelt werden. Um den Einfluss der Thixotropie, siehe Abschnitt 3.2.1.2, gering zu halten, wurde zur Auswertung der abfallende Ast des Entlastungsbereiches verwendet und die rheometrischen Kenngrößen Fließgrenze g und plastische Viskosität h berechnet. Während der Prüfdauer wurde die Temperatur des Mörtels konstant bei 20 °C gehalten.



In Bild 6.3.4 ist beispielhaft der Verlauf des Scherwiderstandes für Mörtel PK 168 mit einer Fließmitteldosierung von 0,9 M.-% v. z dargestellt. Das Ansteifverhalten des Mörtels ist durch den Anstieg des Scherwiderstandes erkennbar. Zu den Zeitpunkten 0, 20, 40 und 60 Minuten nach Messbeginn wurden die Fließkurven nach Bingham ermittelt. Die zugehörigen Fließkurven sind in Bild 6.3.5 zu sehen. Durch das Ansteifen erhöhen sich sowohl die Fließgrenze als auch die Viskosität. Die Fließkurve zum Prüfzeitpunkt $t = 90$ Minuten konnte nicht bestimmt werden, da der Mörtel schon so stark angesteift war, dass durch die Erhöhung der Belastungsgeschwindigkeit gegen 40 upm die Grenze des vom Rotationsrheometer maximal aufnehmbaren Scherwiderstandes erreicht und der Versuch dadurch automatisch abgebrochen wurde. Die errechneten rheometrischen Kenngrößen der Fließgrenzen und der Viskositäten in Abhängigkeit vom Wassergehalt und von der Fließmitteldosierung sind in den Tafeln D.1 bis D.3, Anhang D, zusammengestellt.

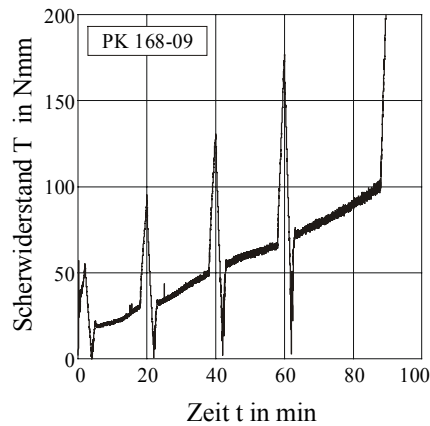


Bild 6.3.4: Ermittelter Scherwiderstand in Abhängigkeit von der Zeit für Mörtel PK 168-0,9

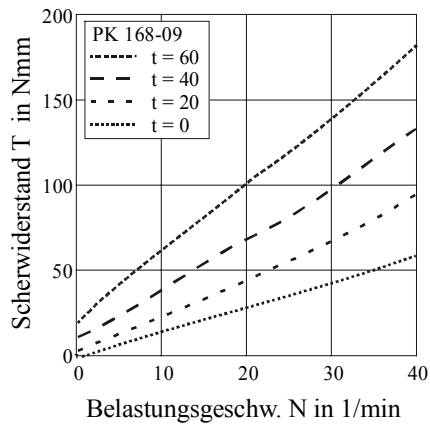


Bild 6.3.5: Fließkurven aus Bild 6.3.6 zur Ermittlung des Ansteifverhaltens von Mörtel PK 168-0,9

6.3.4 Untersuchung der Verflüssigung mit rheologischen Ersatzkenngrößen

Der Einfluss des Wasser- und Fließmittelgehalts auf die Verflüssigung und Verarbeitbarkeitseigenschaften der Mörtel wurde auch über die zeitliche Veränderung der rheologischen Ersatzkenngrößen Mörtelsetzfließmaß und Mörtelauslaufzeit bestimmt.

Die Ermittlung der Mörtelsetzfließmaße sm_m erfolgte in Anlehnung an die Bestimmung der relativen Ausbreitfläche nach dem β_p -Wert-Verfahren (siehe Abschnitt 5.5.4). Verwendet wurde der Mörtelsetztrichter nach Haegermann (DIN 1164, Ausgabe 1958) und der Ausbreittisch zur Bestimmung des Ausbreitmaßes nach DIN EN 12350. Die Mörtelprobe wurde dabei jedoch nicht geschockt. Der Mörtel wurde vor der Prüfung kurz aufgemischt und in den Mörtelsetztrichter eingefüllt. Nach Ziehen des Mörtelsetztrichters wurde das Mörtelausbreitmaß nach Beendigung des Fließvorgangs mit einer Schieblehre in zwei Richtungen rechtwinkelig zueinander gemessen und in Millimetern angegeben. Das Mörtelsetzfließmaß wurde je nach Verflüssigungsdauer zu den Prüfzeitpunkten 0, 10, 20, 30, 45, 60, 75, 90, 105 und 120 Minuten nach Mischungsende ermittelt. Bild 6.3.6 zeigt die Mörtelsetzfließmaßprüfung. Das Setzfließmaß wird in erster Linie durch die Fließgrenze des Mörtels beeinflusst. Je niedriger die Fließgrenze ist, desto größer ist der sich ausbildende Ausbreitkuchen. Die Fließgrenze wiederum hängt hauptsächlich vom Grad der Agglomeration des Mehlkorns im Mörtel ab, die am wirkungsvollsten mit Fließmittel reduziert werden kann, siehe

Abschnitt 3.4.4. Daher ist das Setzfließmaß in erster Linie geeignet, die Fließgrenze und den optimalen Fließmittelgehalt zu beurteilen. Mit diesem Versuch können ferner das Zusammenhaltevermögen und die Entmischungsneigung des Mörtels durch Begutachtung des gebildeten Ausbreitkuchens (homogen, zerfallen, Leimrand, Absetzungserscheinungen über die Höhe des Ausbreitkuchens usw.) bewertet werden.

Die Ermittlung der Mörtelauslaufzeit T_m erfolgte mit dem in Bild 6.3.7 dargestellten Auslaufrichter. Der Mörtel wurde vor der Prüfung kurz aufgemischt und in den Mörtelauslaufrichter eingefüllt. Nach dem Öffnen der Verschlussklappe am Trichterboden des Mörtelauslaufrichters wurde die Zeit gemessen, die der Mörtel benötigte, um aus dem Trichter auszulaufen. Die Auslaufzeit wurde auf Zehntelsekunde gerundet angegeben. Die Mörtelauslaufzeit wurde je nach Verflüssigungsdauer zu den Prüfzeitpunkten 0, 10, 20, 30, 45, 60, 75, 90, 105 und 120 Minuten nach Mischungsende ermittelt. Die Viskosität eines Mörtels ist hauptsächlich vom Wasser-Feststoff-Verhältnis abhängig. Somit fließen wasserreichere Mörtel schneller aus dem Trichter aus und weisen eine niedrigere Viskosität auf als wasserärmere, siehe Abschnitt 3.4.4.

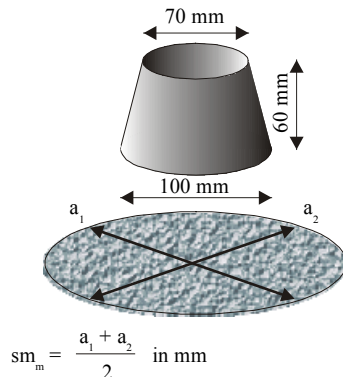


Bild 6.3.6: Ermittlung des Mörtelsetzfließmaßes sm_m

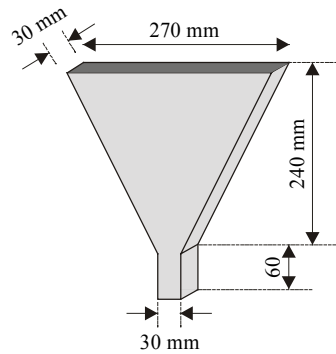


Bild 6.3.7: Trichter zur Bestimmung der Mörtelauslaufzeit T_m

Die ermittelten Kenngrößen der Mörtel-Setzfließmaße und der -Auslaufzeiten in Abhängigkeit vom Wassergehalt, von der Fließmitteldosierung sowie der Zeit sind in den Tafeln D.4 bis D.6, Anhang D, zusammengestellt.

6.3.5 Untersuchung der Verflüssigung über optische Charakterisierung von Probekörpern

Um zusätzliche Informationen über die Verarbeitbarkeitseigenschaften in Abhängigkeit von der Zeit zu erhalten, wurden mit den Mörteln zu verschiedenen Zeitpunkten nach Mischungsende zylinderförmige Probekörper (Höhe $h = 120$ mm, Durchmesser $d = 50$ mm) hergestellt. Durch die augenscheinliche Begutachtung der Mantelflächen sowie der Herstellungsoberseiten der erhärteten Mörtel konnten die Prüfergebnisse an den Frischmörteln hinsichtlich Verarbeitbarkeit für Selbstverdichtung bzw. unzureichende Verarbeitbarkeit infolge von Stagnation sowie unzureichende Verarbeitbarkeit infolge von Sedimentation bewertet werden. Die Bilder 6.3.8 und 6.3.9 zeigen beispielhaft die für die Begutachtung der unterschiedlichen Verarbeitbarkeitseigenschaften charakteristischen Ausbildungen der Zylinderoberflächen.

Besäß der Mörtel zum Zeitpunkt der Herstellung selbstverdichtende Eigenschaften, wies die Mantelfläche eine geringe Porosität auf und zeigte eine geschlossene, nahezu glatte Oberfläche. Dies ist in dem Bild 6.3.8 an dem mittleren Zylinder zu sehen.

War die Verarbeitbarkeit des Mörtels zum Herstellzeitpunkt unzureichend infolge von Sedimentation, konnte dies an der porenfreien Mantelfläche mit dem zum Teil wellenförmigen Muster erkannt werden, siehe Bild 6.3.8, linker Zylinder. Die Viskosität war dann so niedrig, dass nahezu die gesamte Luft entweichen konnte. Die Herstellungsoberseiten wiesen zusätzlich ein sehr poriges, zum Teil gerissenes Gefüge auf, da sich der Mehlkornleim auf der Oberseite ansammelte, siehe Bild 6.3.9, Zylinder links oben. Diese durch die Hydratation gebildete lose „Schaumstruktur“ zeigte nur eine geringe Festigkeit, da die Zementpartikel zum Teil in Schwebe hydratisierten und dadurch untereinander keinen Verbund eingehen konnten, siehe auch [Spa95].

Wies der Mörtel zum Herstellzeitpunkt unzureichende Verarbeitbarkeit infolge von Stagnation auf, konnte dies am Lufteinschluss an der porig-welligen Mantelseite gesehen werden, siehe Bild 6.3.8 rechter Zylinder.

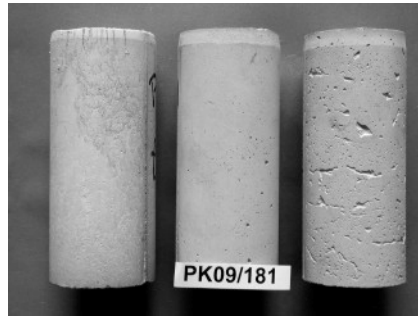


Bild 6.3.8: Mantelflächen zylinderförmiger Probekörper zur Begutachtung der Verarbeitbarkeitseigenschaften



Bild 6.3.9: Herstellungsoberseiten zylinderförmiger Probekörper zur Begutachtung der Verarbeitbarkeitseigenschaften

Die Stabilität der Mörtel konnte bei den verwendeten Mörtelzusammensetzungen nicht über die qualitative Beurteilung der Kornverteilung der groben Gesteinskörnung in der Bruchfläche längsgespaltener Zylinder bewertet werden. Das geringe Größtkorn von 2 mm verbunden mit hohen Leimgehalten ließen eine ausreichende Bewertung nicht zu.

6.3.6 Bewertung der Ergebnisse der Mörteluntersuchungen

6.3.6.1 Allgemeines

Durch die Zusammenführung der Ergebnisse aus den Untersuchungen an den selbstverdichtenden Mörteln zum Einfluss der Wasser- und Fließmittelgehalte auf die Verflüssigung und Verarbeitbarkeit konnten die Auswirkungen der Fließmitteldosierung auf die zeitabhängigen Verarbeitbarkeitseigenschaften aufgezeigt und der Einfluss der Schwankungsbreite um den optimalen Wassergehalt ermittelt werden.

6.3.6.2 Zusammenhang zwischen rheometrischen Kenngrößen und rheologischen Ersatzkenngrößen

Die Vergleiche der rheologischen Ersatzkenngrößen Mörtelsetzfließmaß sm_m und Trichterauslaufzeit T_m mit den rheometrischen Kenngrößen Fließgrenze g und plastische Viskosität h zeigten untereinander eine gute Übereinstimmung. Lediglich Mörtel mit höherer Viskosität zeigten eine stärkere Spreizung zwischen Auslaufzeit und plastischer Viskosität. Beide rheologischen Hilfsgrößen erwiesen sich im Vergleich mit den rheometrischen Kenngrößen Fließgrenze

und plastische Viskosität als geeignet, die Suspensionseigenschaften der Mörtel ausreichend zu beschreiben, siehe Bilder 6.3.10 und 6.3.11.

Während der Ermittlung der rheologischen Ersatzkenngrößen lassen sich darüber hinaus wichtige Hinweise zur Stabilität des Mörtels ableiten, die in reometrischen Prüfungen nicht gewonnen werden können. Im Hinblick auf die Verarbeitbarkeitseigenschaften selbstverdichtender Betone ist zudem eine größere Vergleichbarkeit der Ergebnisse durch die rheologischen Hilfsgrößen gegeben, da sich das Setzfließmaß und die Trichterauslaufzeit für Mörtel und Beton sehr ähneln.

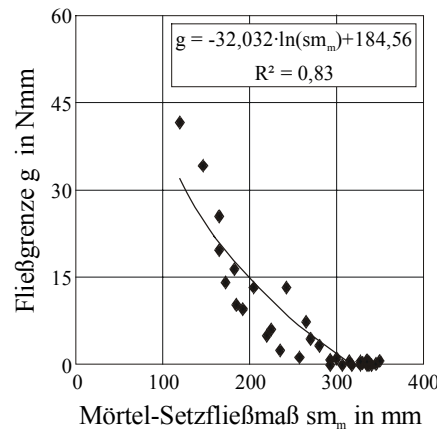


Bild 6.3.10: Zusammenhang zwischen Setzfließmaß und rheometrischer Fließgrenze für alle untersuchten Mörtel

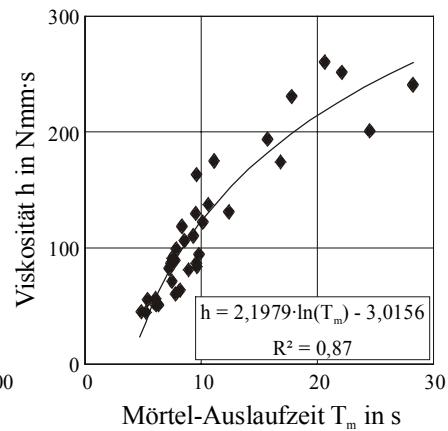


Bild 6.3.11: Zusammenhang zwischen Trichterauslaufzeit und rheometrischer plastischer Viskosität für alle untersuchten Mörtel

6.3.6.3 Sättigungsverhalten der selbstverdichtenden Mörtel

In Bild 6.3.12 ist die Veränderung der Fließgrenze in Abhängigkeit von der Fließmitteldosierung für die Mörtel unmittelbar nach Mischungsende dargestellt. Das Bild 6.3.13 zeigt die Veränderung des Setzfließmaßes in Abhängigkeit von der Fließmitteldosierung für die drei Mörtel zu denselben Prüfzeitpunkten. Die Untersuchungen an den Mörteln zeigten sowohl bei der Bestimmung der Fließgrenze im Viskomat als auch bei der Ermittlung des Setzfließmaßes das Sättigungsverhalten. Ein Fließmittelgehalt von 0,7 M.-% v. z. reichte in allen Fällen nicht für eine vollständige Dispergierung des Mehlkorns in den Mörtelsystemen aus. Erst ab einer Fließmitteldosierung von 0,8 M.-% v. z. war

die Fließgrenze der Mörtel nahezu gegen Null reduziert und das Mörtel-Setzfließmaß nicht weiter systematisch steigerbar.

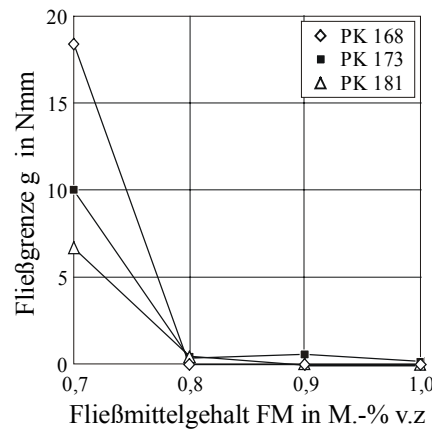


Bild 6.3.12: Veränderung der rheometrischen Fließgrenze in Abhängigkeit vom Fließmittelgehalt zum Zeitpunkt $t = 0$

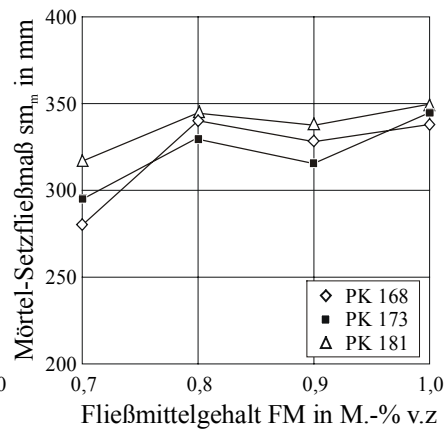


Bild 6.3.13: Veränderung des Mörtel-Setzfließmaßes in Abhängigkeit vom Fließmittelgehalt zum Zeitpunkt $t = 0$

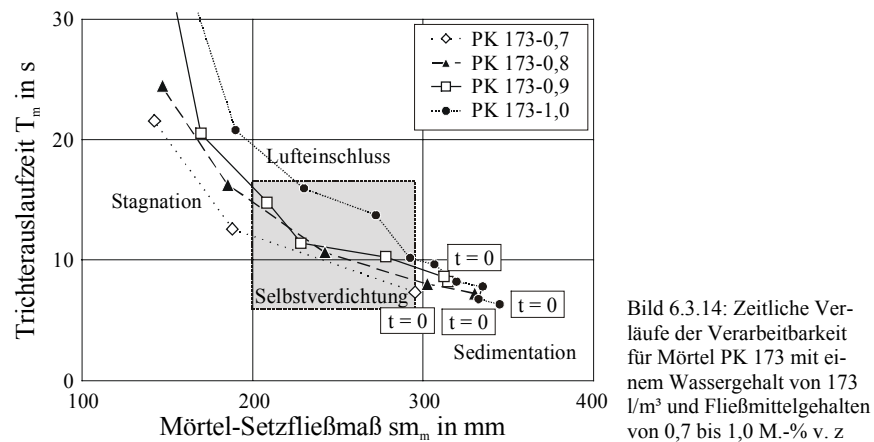
6.3.7 Charakterisierung der Verarbeitbarkeitseigenschaften selbstverdichtender Mörtel

Die Verarbeitbarkeitseigenschaften selbstverdichtender Mörtel lassen sich in Verarbeitbarkeit für Selbstverdichtung und unzureichende Verarbeitbarkeit unterscheiden, wobei zwischen unzureichender Verarbeitbarkeit infolge von Stagnation und unzureichender Verarbeitbarkeit infolge von Sedimentation zu trennen ist: Selbstverdichtende Eigenschaften liegen vor, wenn der Mörtel ausreichend fließt und die Viskosität so hoch ist, um einerseits die Gesteinskörner während des Fließens in Schwebe zu halten und andererseits so gering ist, dass die vorhandene Luft in einem ausreichenden Maße entweichen kann. Als Maß für die Dispergierung des Mehlkorns wird dabei das Setzfließmaß herangezogen, während die Trichterauslaufzeit ein Kriterium für die Viskosität ist, siehe Abschnitt 6.3.4. Ist das Setzfließmaß zu groß oder die Trichterauslaufzeit zu hoch, kommt es zur Sedimentation. Ist die Fließfähigkeit zu gering oder die Viskosität zu hoch, kann der Mörtel nicht ausreichend entlüften sowie die Schalung füllen und es kommt zur Stagnation.

Die Untersuchungen zum Sättigungsverhalten zeigten, dass für diese Mörtel mindestens eine Fließmitteldosierung von 0,8 M.-% v. z. vorzusehen war, um

vollständige Dispergierung und damit selbstverdichtende Eigenschaften zu erzielen. Eine Fließmitteldosierung darüber hinaus regelte die zeitabhängigen Verarbeitbarkeitseigenschaften.

Durch den Abgleich der rheologischen Ersatzkenngrößen mit den zu den gleichen Zeitpunkten hergestellten Probekörpern zur optischen Charakterisierung konnte gezeigt werden, dass ein Bereich existiert, in dem dieser Mörtel selbstverdichtende Eigenschaften besaß. Es zeigte sich in diesem Fall, dass der Mörtel selbstverdichtende Eigenschaften aufwies, wenn das Setzfließmaß sm_m zwischen 200 und 280 mm und die Trichterauslaufzeit T_m zwischen 6 und 16 Sekunden lag. In Abhängigkeit des Wasser- und Fließmittelgehalts erreicht der Mörtel diesen Verarbeitbarkeitsbereich zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach Mischungsende. Damit sind sowohl die Einflüsse von Schwankungen des Wassergehalts auf die Verarbeitbarkeitseigenschaften charakterisierbar als auch die Verarbeitbarkeitszeit durch Fließmittelzugabe steuerbar. In Bild 6.3.14 ist für den Mörtel PK 173 der Einfluss der Fließmitteldosierung von 0,7 bis 1,0 M.-% v. z auf die Verarbeitbarkeitseigenschaften dargestellt. Die grau hinterlegte Fläche kennzeichnet den Bereich für Selbstverdichtung. Die zugehörigen Werte sind in Tafel D.5, Anhang D, aufgeführt.



Die Bilder 6.3.15 bis 6.3.17 fassen die Ergebnisse zur Ermittlung des zeitabhängigen Verarbeitbarkeitsverhaltens zusammen und zeigen die Zeiträume nach Mischungsende, in denen der Mörtel in Abhängigkeit von seinem Wasser- und Fließmittelgehalt selbstverdichtende Eigenschaften aufwies. Insgesamt war es schwierig, den Mörtel mit diesen Ausgangsstoffen für selbstverdichtende Eigen-

schaften einzustellen. Der Korridor für Selbstverdichtung war sowohl mit dem optimalen Wassergehalt von 173 l/m³ als auch mit dem reduzierten Wassergehalt von 168 l/m³ sehr schmal. Der Mörtel PK 181 mit dem erhöhten Wassergehalt zeigte selbstverdichtende Eigenschaften bis zu einer Stunde. Dafür vergrößerte sich jedoch der instabile Bereich auf bis zu 60 Minuten nach Mischungs-ende, ehe der Mörtel selbstverdichtende Eigenschaften erreichte.

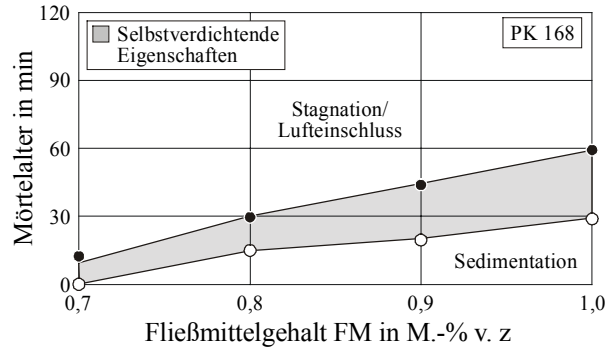


Bild 6.3.15: Zeitlicher Verlauf der Verarbeitbarkeit von Mörtel PK 168 in Abhängigkeit von der Fließmitteldosierung

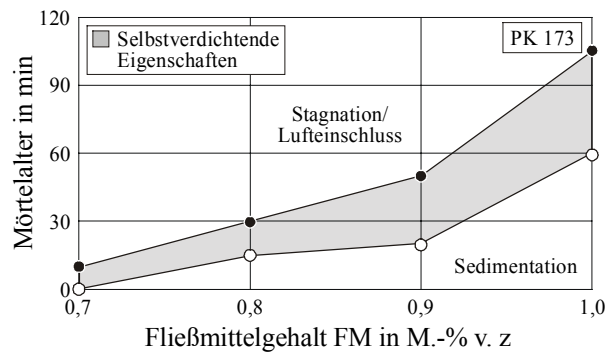


Bild 6.3.16: Zeitlicher Verlauf der Verarbeitbarkeit von Mörtel PK 173 in Abhängigkeit von der Fließmitteldosierung

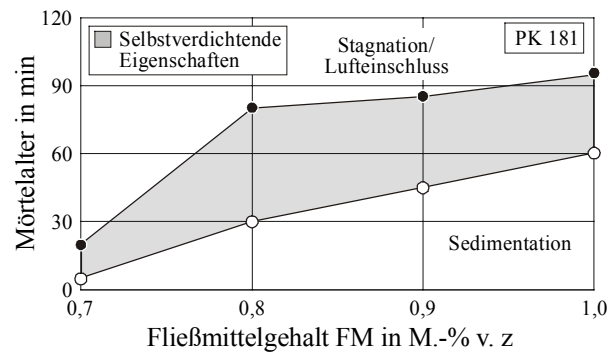
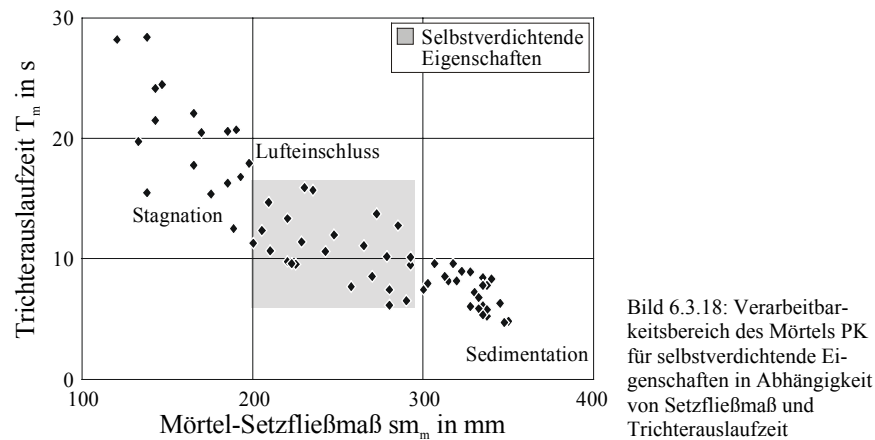


Bild 6.3.17: Zeitlicher Verlauf der Verarbeitbarkeit von Mörtel PK 181 in Abhängigkeit von der Fließmitteldosierung

6.3.8 Zusammenfassung

Die Untersuchungen zur Ermittlung der rheometrischen Größen Fließgrenze und plastische Viskosität und der rheologischen Hilfsgrößen Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit an den Mörteln zeigten eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Mit Hilfe des Mörtelsetzfließmaßes kann die Fließgrenze und der Grad der Dispergierung hinreichend genau ermittelt werden. Die Trichterauslaufzeit ist im gleichen Maße ein geeignetes Kriterium, um die Viskosität eines Mörtels zu beurteilen.

Durch die Kombination von Frisch- und Festmörteluntersuchungen konnten die Verarbeitbarkeitsbereiche für selbstverdichtende Eigenschaften, Stagnation und Sedimentation eines Mörtels in Abhängigkeit des Wasser- und Fließmittelgehalts ermittelt werden. Ebenso waren die zeitlichen Verläufe der verschiedenen Bereiche quantifizierbar. Werden in einem Diagramm die rheologischen Hilfsgrößen Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit aufgetragen, lässt sich aus den Ergebnissen der Frisch- und Festmörtelprüfungen für den jeweiligen Mörtel der Verarbeitbarkeitsbereich für selbstverdichtende Eigenschaften angeben, siehe Bild 6.3.18.



6.4 Verflüssigung selbstverdichtender Betone

6.4.1 Allgemeines

In Abschnitt 6.3 wurden die Einflüsse von Wasser und Fließmittel auf die Verarbeitbarkeitseigenschaften selbstverdichtender Mörtel gezeigt. Aufbauend darauf wurden die Einflüsse auf die Verarbeitbarkeit und die Steuerung der Frischbetoneigenschaften von selbstverdichtenden Betonen untersucht.

6.4.2 Zusammensetzung der Betone

Zur Ermittlung der Einflussgrößen auf das Verflüssigungsverhalten und die Verarbeitbarkeitseigenschaften wurden Untersuchungen an fünf selbstverdichtenden Betonen durchgeführt. Durch Variation des Wasser- und Fließmittelgehalts der Betone konnten der optimale Wassergehalt eines Betons sowie der Einfluss des Fließmittels auf die Verarbeitbarkeit ermittelt werden. Entsprechend den Untersuchungen zur granulometrischen Charakterisierung des Mehlkorns wurden die selbstverdichtenden Betone in unterschiedlichen Zusammensetzungen sowohl aus gebrochenkörnigem als auch aus gemischtkörnigem Mehlkorn zusammengesetzt. Die Betone wiesen ein Leimvolumen von rund 400 l/m³ auf. Daraus ergab sich ein Mehlkorngehalt aus Zement und Zusatzstoff von 550 kg/m³ zuzüglich dem Feinanteil der Gesteinskörnung.

Die Mehlkornhaufwerke waren so zusammengesetzt, dass SVB 1, SVB 3 und SVB 4 die Anforderungen an Konstruktionsbetone für die Expositionsklassen

XC1/XC2 und SVB 2 und SVB 5 die Anforderungen für die Expositionsklassen XC4/XF1 nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2 erfüllen. Die gewählten Mehlkornzusammensetzungen der selbstverdichtenden Betone sind in Tafel 6.4.1 aufgeführt. Die Tafel enthält ebenfalls die jeweiligen Startwassergehalte für die Betonoptimierung sowohl nach dem β_p -Wert-Verfahren als auch nach dem β_p^* -Wert-Verfahren, siehe Abschnitt 5.7, und den nach der Optimierung ermittelten optimalen Wassergehalt w_{opt} . Bild 6.4.1 zeigt die Differenzen der beiden Startwassergehalte zum optimalen Wassergehalt. Es ist zu erkennen, dass beide Verfahren gute Ausgangswerte für die weitere Betonoptimierung ergaben. Weiterhin ist zu erkennen, dass in der Regel der β_p -Wert höhere Wassergehalte lieferte, wobei die Ermittlung des Startwassergehaltes über den β_p^* -Wert geringere Wassergehalte ergab. Dies zeigt, dass das β_p^* -Wert-Verfahren innerhalb des Gültigkeitsbereiches des β_p -Wert-Verfahrens liegt und geeignet ist, den Wassergehalt für die weitere Optimierung abzuschätzen.

Tafel 6.4.1: Mehlkornzusammensetzung und Wassergehalte der untersuchten Betone

Schlüsselnummer		SVB 1	SVB 2	SVB 3	SVB 4	SVB 5
Zement	-	Z I.2	Z I.2	Z III.1	Z III.2	Z III.2
Zementgehalt	kg/m ³	240	285	240	240	270
Zusatzstoff	-	KM5	KM5	FA1	FA2	FA2
Zusatzstoffgehalt	kg/m ³	310	265	310	310	280
Mehlkorngvolumen V_p	l/m ³	192,2	190,1	214,8	214,8	211,7
$\beta_p = V_w/V_p$	-	0,99	1,00	0,90	0,78	0,73
Startwassergehalt V_w nach β_p	l/m ³	190	189	193	168	155
Steigungsmaß n	-	0,72	0,72	0,81	0,86	0,87
$\beta_{p,n}$	-	0,71	0,71	0,84	0,90	0,92
$\beta_p^* = V_w/V_p$	-	0,84	0,84	0,76	0,81	0,82
Startwassergehalt V_w nach β_p^*	l/m ³	161	160	163	174	174
Optimaler Wassergehalt w_{opt}	l/m ³	175	172	175	168	173

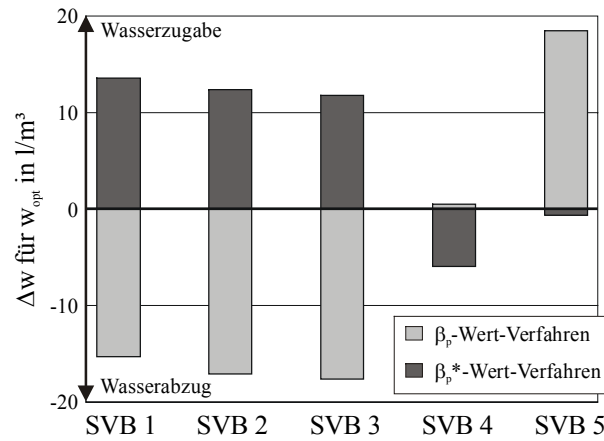


Bild 6.4.1: Korrektur der Startwassergehalte für die Betonoptimierung nach dem β_p - und dem β_p^* -Wert-Verfahren gegenüber dem optimalen Wassergehalt

Als Gesteinskörnung wurde Rheinsand und Rheinkies verwendet. Alle Betone besaßen dieselbe, in Vorversuchen optimierte Sieblinie, siehe Bild 6.4.2. Dadurch war blockierungsfreies Fließen in allen Fällen sichergestellt.

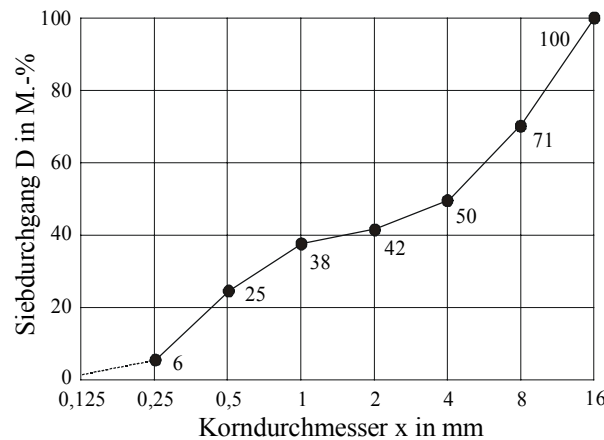


Bild 6.4.2: Sieblinie zur Bestimmung des Blockierverhaltens

Die Betone SVB 1 bis SVB 4 wurden mit PCE 2 verflüssigt. Bei SVB 5 kam das Fließmittel PCE 4 zum Einsatz, das in der Wirkungsweise identisch ist mit PCE 2. Es weist ein Wirkstoffgehalt von 16,2 M.-% auf und ist damit nur halb so hoch konzentriert wie PCE 2. Der Vorteil der geringeren Konzentration besteht darin, dass das Fließmittel genauer dosiert werden kann. Der erhöhte Lösungswassergehalt von PCE 4 wurde ebenso wie bei PCE 2 auf den Gesamtwas-

sergehalt angerechnet. Als Zugabewasser wurde Trinkwasser aus dem Leitungsnetz der Stadt Düsseldorf verwendet.

Die Zusammensetzung der Betone SVB 1 und SVB 2 ist in Tafel 6.4.2, der Betone SVB 3 in Tafel 6.4.3 und der Betone SVB 4 und SVB 5 in Tafel 6.4.4 dargestellt.

Tafel 6.4.2: Zusammensetzung der Betone SVB 1 und SVB 2

Schlüsselnummer		SVB 1.1	SVB 1.2	SVB 1.3	SVB 1.4	SVB 2.1	SVB 2.2	SVB 2.3
ZI.2	kg/m³	240	240	240	240	285	285	285
KM5	kg/m³	310	310	310	310	265	265	265
w	kg/m³	168	168	175	175	165	172	178
g	kg/m³	1624	1624	1606	1606	1638	1620	1604
PCE 2	M.-% v.z	1,1	1,2	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2
Luft	Vol.-%	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5

Tafel 6.4.3: Zusammensetzung des Betons SVB 3

Schlüsselnummer		SVB 3.1	SVB 3.2	SVB 3.3	SVB 3.4	SVB 3.5
ZIII.1	kg/m³	240	240	240	240	240
FA1	kg/m³	310	310	310	310	310
w	kg/m³	168	175	175	175	182
g	kg/m³	1566	1548	1548	1548	1532
PCE 2	M.-% v.z	1,0	1,0	1,1	1,2	1,0
Luft	Vol.-%	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5

Tafel 6.4.4: Zusammensetzung der Betone SVB 4 und SVB 5

Schlüsselnummer		SVB 4.1	SVB 4.2	SVB 4.3	SVB 4.4	SVB 4.5	SVB 4.6	SVB 5.1	SVB 5.2	SVB 5.3
ZIII.2	kg/m³	240	240	240	240	240	240	270	270	270
FA2	kg/m³	310	310	310	310	310	310	280	280	280
w	kg/m³	168	168	168	168	175	175	173	173	180
g	kg/m³	1566	1566	1566	1566	1548	1548	1561	1561	1542
PCE 2	M.-% v.z	0,8	0,9	1,0	1,1	0,8	0,9	-	-	-
PCE 4	M.-% v.z	-	-	-	-	-	-	2,2	2,4	2,2
Luft	Vol.-%	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5

6.4.3 Prüfverfahren

6.4.3.1 Setzfließmaß

Das Setzfließmaß sm ist eine Kombination aus Slump- und Ausbreitmaß. Zur Ermittlung des Setzfließmaßes, siehe Bild 6.4.3, wird die Hohlkegelstumpfform (Setztrichter) aus der Slumpprüfung nach DIN EN 12350-2 umgedreht auf eine Setzfließplatte mit einer Kantenlänge von mindestens 800 x 800 mm aufgesetzt und mit SVB befüllt. Nach Ziehen des Setztrichters wird analog zum Ausbreitmaß der mittlere Durchmesser des sich nach Beendigung des Fließvorgangs ausgebreiteten Betons gemessen. Während der Prüfung darf keine Verdichtungsenergie eingetragen werden, so dass der SVB nur unter dem Einfluss der Schwerkraft fließt.

Analog zum Mörtelsetzfließmaß in Abschnitt 6.3.4 wird das Setzfließmaß im Wesentlichen durch die Fließgrenze des Betons beeinflusst und ist in erster Linie geeignet, die Fließgrenze des SVB und den Fließmittelgehalt zu beurteilen.

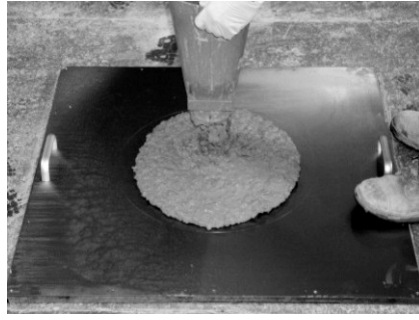


Bild 6.4.3: Setzfließmaßprüfung

6.4.3.2 Trichterauslaufzeit

Die Trichterauslaufzeit T für SVB dient wie die Mörteltrichterauslaufzeit in Abschnitt 6.3.4 als Messgröße zur Beschreibung der Viskosität. Sie ist aus dem japanischen SVB-Entwurfskonzept entnommen. Zur Durchführung wird ein Trichter, wie in Bild 6.4.4 dargestellt, benötigt. Der SVB wird bei geschlossener Auslaufklappe bis zum Rand in den Trichter gefüllt. Danach wird der Verschluss geöffnet und die Zeit in Sekunden gemessen, die der SVB benötigt, um aus dem Trichter auszulaufen.

Die Viskosität des SVB ist neben dem Wasser-Feststoff-Verhältnis auch von der Gesamtsieblinie abhängig. Somit fließen wasser- und leimreichere SVB schneller aus dem Trichter aus und weisen eine niedrigere Viskosität auf als wasser- und leimärmere.

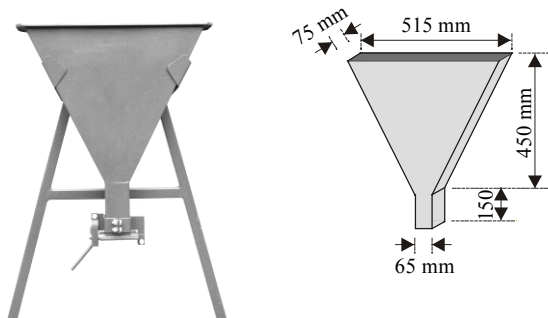


Bild 6.4.4: Auslauftrichter für SVB

6.4.3.3 Fließzeit

Die Ermittlung der Fließzeit t_{500} stellt eine weitere Möglichkeit dar, die Viskosität eines SVB zu beurteilen. Sie wird während der Setzfließmaßprüfung, siehe

Abschnitt 6.4.3.1, gemessen. Die Fließzeit ist die Zeit, die der SVB benötigt, um nach dem Ziehen des Setztrichters auf einen Durchmesser von 500 mm zu fließen. Der Durchmesser von 500 mm ist auf der Setzfließplatte entsprechend zu markieren. Je größer die Fließzeit ist, desto höher ist die Viskosität des SVB.

6.4.3.4 Optische Charakterisierung von Probekörpern

Die augenscheinliche Begutachtung der Stabilität von SVB an einer Festbetonprobe ist eine einfache und sichere Art, da man den entgültigen Zustand selbst prüft. Ein Zylinderform ($h = 300 \text{ mm}$, $\varnothing = 150 \text{ mm}$) wird mit SVB befüllt. Der Probekörper wird dann nach dem Erhärten längs gesägt oder gespalten. Anhand des Schnitt- oder Bruchbildes kann bestimmt werden, ob der SVB stabil war oder ob die grobe Gesteinskörnung abgesunken ist. Darüber hinaus kann analog zu Abschnitt 6.3.5 die Entlüftung des Betons über die Mantelfläche begutachtet werden. Bild 6.4.5 zeigt beispielhaft drei verschiedene Probekörper. Das Gefüge und die Mantelfläche des mittleren Probekörpers zeigt, dass der Beton zum Einbaupunkt selbstverdichtende Verarbeitungseigenschaften besaß. Die Betone, mit denen die beiden anderen Probekörper hergestellt wurden, wiesen zum Einbaupunkt unzureichende Verarbeitungseigenschaften infolge von Stagnation, siehe linker Probekörper, und Sedimentation, siehe rechter Probekörper, auf.

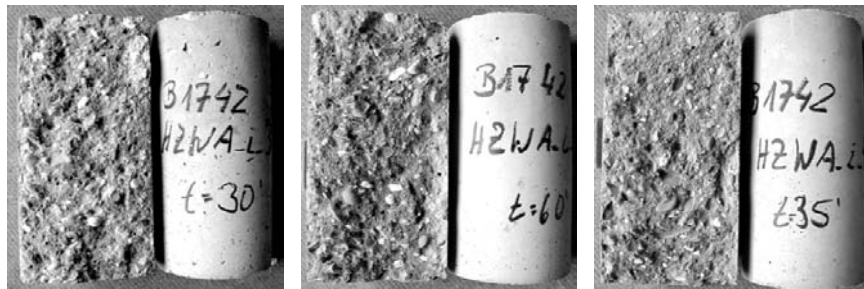


Bild 6.4.5: Mantel- und Bruchflächen zylinderförmiger Probekörper zur Begutachtung der Verarbeitungseigenschaften von SVB (linker Zylinder Stagnation, mittlerer Zylinder Selbstverdichtung, rechter Zylinder Sedimentation)

6.4.3.5 Blockierring-Prüfung

Die Blockierring-Prüfung dient der Ermittlung der Blockierneigung eines SVB. Sie erfolgt analog zur Setzfließmaßprüfung, siehe Abschnitt 6.4.3.1. Zusätzlich wird jedoch der Blockierring ($\varnothing_{\text{Ring}} = 300 \text{ mm}$, 16 Stäbe mit $\varnothing 18 \text{ mm}$, $h = 125 \text{ mm}$) benötigt, siehe Bild 6.4.6. Alle Blockierversuche, wie auch der Box-Test, siehe Abschnitt 6.4.3.6, simulieren Einbaustände, bei denen der Beton Fließ-

hindernisse überwinden muss. Der Grad der Blockierneigung wird in der Regel durch das Messen eines Niveauunterschiedes bestimmt.

Der Vorteil des Blockierringversuchs liegt in der Verbindung der Setzfließmaßprüfung und der Einbausimulation. Der Blockierring wird durch Markierungen auf der Setzfließplatte zentriert. Dann wird, wie in Abschnitt 6.4.3.1, der Setztrichter in der Mitte der Platte aufgesetzt, mit SVB befüllt und hochgezogen. Danach breitet sich der SVB auf der Setzfließplatte aus und muss dabei die Stäbe des Blockierringes umfließen. Ein SVB blockiert nicht, wenn die Differenz der Setzfließmaße aus Setzfließmaßprüfung s_m und aus Blockierringprüfung s_{m_b} kleiner 50 mm ist.

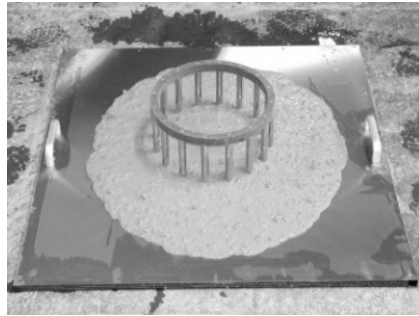
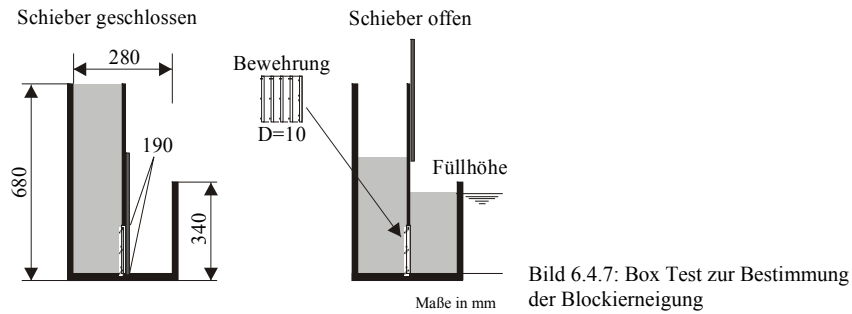


Bild 6.4.6: Blockierring zur Bestimmung der Blockierneigung

6.4.3.6 Box-Test

Der Box-Test ist ein Verfahren, bei dem der SVB auf seine Einbaubarkeit und Blockierneigung überprüft wird, siehe Bild 6.4.7. Dabei wird eine abgeschlossene, vertikale Kammer mit dem zu prüfenden Beton befüllt, wodurch sich eine hydrostatische Druckhöhe ergibt. Nach Öffnen eines Schiebers muss sich der Beton durch Fließhindernisse hindurch vertikal bis auf eine Füllhöhe von mindestens 320 mm ausspiegeln.



6.4.4 Herstellung der Betone und Prüfreihefolge

Die Betonausgangsstoffe wurden in der Reihenfolge Gesteinskörnung, Zement und Zusatzstoff, Wasser und Fließmittel in einem 250 Liter fassenden Laborzwangsmischer 3 Minuten nach Fließmittelzugabe gemischt. Danach wurden das Setzfließmaß s_m mit zugehöriger Fließzeit t_{500} , die Trichterauslaufzeit T , die Steighöhe in der Box sowie das Setzfließmaß mit Blockierring $s_{m,b}$ mit zugehöriger Fließzeit $t_{500,b}$ gemessen. Die Frischbetonprüfungen wurden im Abstand von 30 Minuten nach kurzem Aufmischen wiederholt.

Erreichte ein Beton die Grenze der Fließfähigkeit für Selbstverdichtung, wurde jeweils eine konstante Menge von 0,2 M.-% Fließmittel in den Mischer nachdosiert und 90 s gemischt. Unmittelbar danach wurden die Frischbetonprüfungen am nachdosierten SVB wiederholt und anschließend im alten Rhythmus fortgeführt.

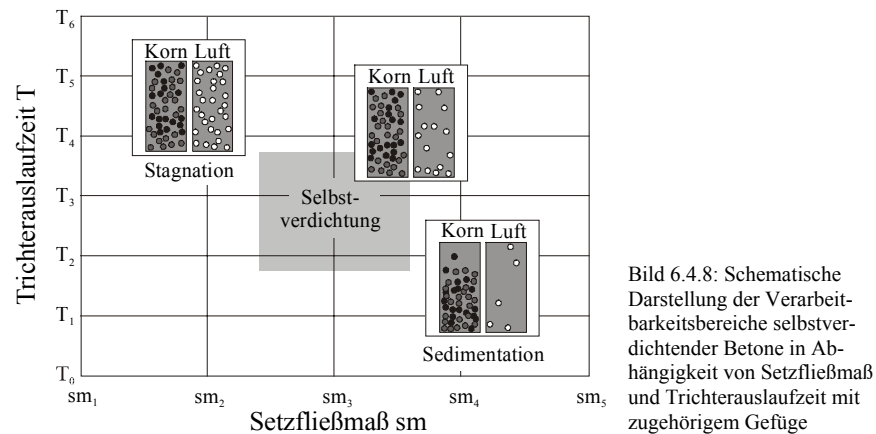
6.4.5 Einfluss der Verflüssigung auf Verarbeitbarkeitseigenschaften selbstverdichtender Betone

6.4.5.1 Allgemeines

Die Beurteilung der Verflüssigung und der Verarbeitbarkeitseigenschaften der untersuchten selbstverdichtenden Betone erfolgte analog zu den Mörtelprüfungen durch das Setzfließmaß und die Trichterauslaufzeit unter Berücksichtigung des Gefüges zylinderförmiger Probekörper, die mit dem jeweiligen Beton zum Prüfzeitpunkt hergestellt wurden. Die Wertepaare Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit wurden in einem Diagramm gegeneinander aufgetragen. Durch die augenscheinliche Charakterisierung der zugehörigen Zylinder konnten für jeden SVB Bereiche eingegrenzt werden, in denen der Beton selbstverdichtende Ei-

genschaften besaß oder unzureichende Verarbeitbarkeitseigenschaften infolge von Stagnation bzw. Sedimentation aufwies. Bild 6.4.8 zeigt schematisch die Verarbeitbarkeitsbereiche selbstverdichtender Betone in Abhängigkeit von Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit mit zugehörigem Gefüge.

Die ermittelten Kenngrößen der Setzfließmaße und der Trichterauslaufzeiten in Abhängigkeit vom Wassergehalt, von der Fließmitteldosierung sowie der Zeit sind für die untersuchten selbstverdichtenden Betone SVB 1 bis SVB 5 in den Tafeln E.1 bis E.6, Anhang E, zusammengestellt. Alle Betone erfüllten die Anforderungen für blockierungsfreies Fließen sowohl im Box Test als auch in der Blockierringprüfung.



6.4.5.2 Verarbeitbarkeitseigenschaften von SVB 1

Aus der Kombination der Frisch- und Festbetonprüfungen konnte für SVB 1 ein Bereich abgeleitet werden, in dem die Betone selbstverdichtende Eigenschaften aufwiesen: Bei Setzfließmaßen zwischen 600 und 700 mm bei Trichterauslaufzeiten zwischen 8 und 18 Sekunden zeigten sie optimale selbstverdichtende Eigenschaften.

SVB 1.3 wies den optimalen Wassergehalt von 175 l/m³ und eine Fließmitteldosierung von 1,1 M.-% v. z auf, siehe Tafel 6.4.2. SVB 1.1 besaß im Gegensatz dazu bei sonst gleicher Zusammensetzung 7 l/m³ weniger Wasser. Unmittelbar nach der Herstellung neigte SVB 1.3 zum Sedimentieren, siehe Bild 6.4.9. Das Setzfließmaß betrug 750 mm und die Trichterausfließzeit war mit 6 Sekunden sehr schnell. Der Beton lag außerhalb des Bereiches für Selbstverdichtung. Zwi-

schen 35 und 75 Minuten nach Mischungsende besaß SVB 1.3 dann selbstverdichtende Eigenschaften, eher er mit einem Setzfließmaß von 600 mm in den Bereich für Selbstverdichtung überging.

SVB 1.1, dem 7 l/m³ Wasser weniger zugegeben wurden, zeigte ein geringes Anfangssetzfließmaß von 690 mm bei einer nahezu unveränderten niedrigen Trichterauslaufzeit von 6 Sekunden, siehe Bild 6.4.9. Der geringere Wassergehalt machte sich nicht so sehr im zeitlichen Verlauf des Setzfließmaßes sondern im steilen Anstieg der Trichterauslaufzeit bemerkbar. Aufgrund der relativ niedrigen Trichterauslaufzeiten der Betone SVB 1.1 und SVB 1.3 wurde auf die Herstellung von Betonen mit einem Wassergehalt von 182 l/m³ verzichtet. Die Wasserzugabe hätte eine weitere Verringerung der Trichterauslaufzeit und damit eine Verschiebung in den Bereich der Sedimentation zur Folge gehabt.

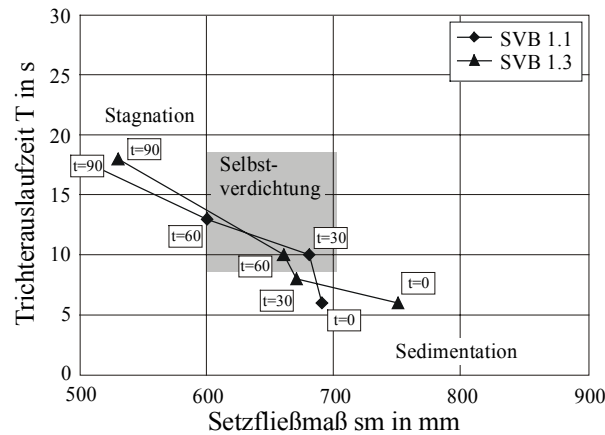


Bild 6.4.9: Verlauf der Verarbeitbarkeit der Betone SVB 1.1 und SVB 1.3

Die Betone SVB 1.2 und SVB 1.4 unterschieden sich von den Betonen SVB 1.1 und SVB 1.3 durch eine Erhöhung der Fließmitteldosierung um 0,1 M.-% auf 1,2 M.-% v. z, siehe Tafel 6.4.2. In beiden Fällen konnte dadurch keine Verbesserung der Verarbeitbarkeit erzielt werden, siehe Bild 6.4.10. Bei SVB 1.2 hatte die Erhöhung des Fließmittelgehalts keinen Einfluss auf das Setzfließmaß und führte nur zu einer verringerten Viskosität. SVB 1.4 zeigte zwar einen günstigen Verlauf des Setzfließmaßes, jedoch blieben die Trichterauslaufzeiten über 90 Minuten auf einem relativ niedrigen Niveau außerhalb des Bereiches für Selbstverdichtung. Danach zeigte auch der Beton SVB 1.4 einen rapiden Abfall der Fließfähigkeit.

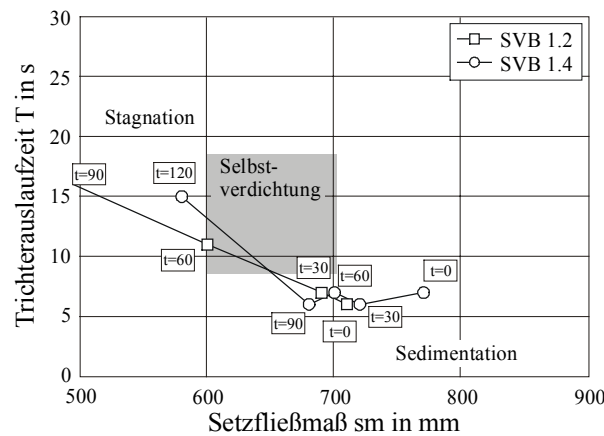


Bild 6.4.10: Verlauf der Verarbeitbarkeit der Betone SVB 1.2 und SVB 1.4

Durch eine Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z. nach 90 Minuten an SVB 1.1 und SVB 1.2 konnten die für Selbstverdichtung benötigten Fließeigenschaften wieder hergestellt werden, siehe Bild 6.4.11. SVB 1.1 erreichte nahezu die Ausgangsfließfähigkeit und besaß für weitere 30 Minuten selbstverdichtende Eigenschaften. Danach zeigte der Beton jedoch wieder einen überproportionalen Abfall der Verarbeitbarkeit. Die Fließmittelnachdosierung an SVB 1.2 zeigte nur geringfügige Wirkung, da der Beton bereits stark angesteift war.

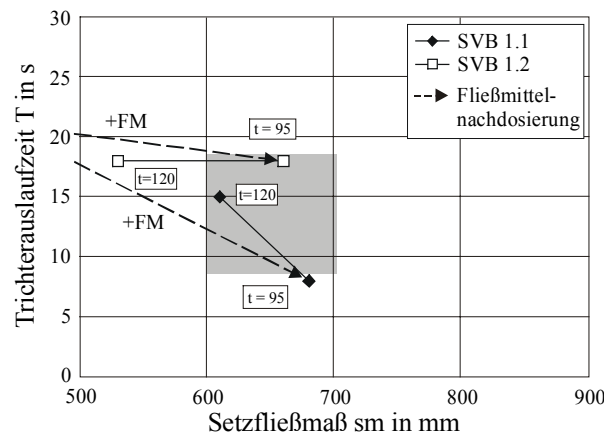


Bild 6.4.11: Einfluss der Fließmittelnachdosierung auf die Verarbeitbarkeit der Betone SVB 1.1 und SVB 1.2

6.4.5.3 Verarbeitbarkeitseigenschaften von SVB 2

Aus der Kombination der Frisch- und Festbetonprüfungen konnte für SVB 2 ein ähnlicher Bereich wie für SVB 1 abgeleitet werden, in dem die Betone selbstverdichtende Eigenschaften aufwiesen: Bei Setzfließmaßen zwischen 600 und 700 mm sowie bei Trichterauslaufzeiten zwischen 8 und 18 Sekunden besaß SVB 2 selbstverdichtende Eigenschaften.

Die Betone SVB 2.1 bis SVB 2.3 mit im Vergleich zu SVB 1 erhöhtem Zementgehalt bei gleichem Mehlkorngesamt, siehe Tafel 6.4.2, zeigten dasselbe Verhalten wie die Betone SVB 1.1 bis SVB 1.4. Trotz hoher Wasser- und Fließmitteldosierungen wurde immer nur ein geringes Setzfließmaß von rd. 730 mm bei gleichzeitig relativ geringen Trichterauslaufzeiten erreicht, siehe Bild 6.4.12. Daher wurde nur der Einfluss des Wassergehalts bei einer konstanten Fließmitteldosierung von 1,2 M.-% v. z auf die Verarbeitbarkeitseigenschaften untersucht.

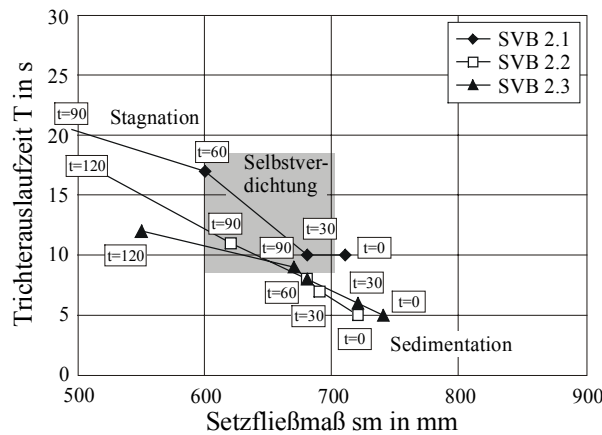


Bild 6.4.12: Verlauf der Verarbeitbarkeit der Betone SVB 2.1 bis SVB 2.3

SVB 2.2 mit in Vorversuchen angepasstem Wassergehalt von 172 l/m³ und einer Fließmitteldosierung von 1,2 M.-% v. z besaß wie auch die übrigen Betone dieser Serie ein relativ geringes Setzfließmaß von 720 mm bei einer geringen Trichterauslaufzeit von 5 Sekunden, siehe Bild 6.4.12. 30 Minuten nach Mischungsende wies der Beton ein Setzfließmaß von 690 mm auf, wäre aber zu diesem Zeitpunkt wegen der immer noch recht geringen Trichterauslaufzeit von 7 s nicht sicher einbaubar gewesen. Nach 60 Minuten erreichte der Beton dann den Bereich für Selbstverdichtung und zeigte bis rund 105 Minuten nach Mischungsende optimale selbstverdichtende Eigenschaften. Danach fiel die Verar-

beitbarkeit mit einem Setzfließmaß von nur noch 430 mm und einer Trichterauslaufzeit von 22 Sekunden stark ab. Eine Nachdosierung von 0,2 M.-% v. z. Fließmittel nach 120 min brachte den Beton auf das nahezu gleiche Verarbeitungsniveau wie 60 Minuten nach Mischungsende zurück, siehe Bild 6.4.13. Anschließend zeigte der Beton für weitere 30 Minuten optimale selbstverdichtende Eigenschaften. SVB 2.1 unterschied sich von SVB 2.2 nur durch einen um 7 l/m^3 geringeren Wassergehalt von 165 l/m^3 , siehe Tafel 6.4.2. Der niedrige Wassergehalt führte zu einer erhöhten Trichterauslaufzeit von 10 Sekunden bei einem Setzfließmaß von 710 mm. SVB 2.1 zeigte bis 60 Minuten nach dem Mischungsende optimale selbstverdichtende Eigenschaften. Danach fielen die Verarbeitungseigenschaften stark ab, was sich besonders in der Abnahme des Setzfließmaßes von 360 mm ausdrückte. Durch eine Nachdosierung von 0,2 M.-% v. z. Fließmittel nach 90 min gelang es kurzzeitig, den Beton noch einmal in den für Selbstverdichtung benötigten Verarbeitungsbereich zu bringen, ehe die Verarbeitbarkeit wieder auf ein Setzfließmaß von 500 mm und eine kaum noch messbare Trichterauslaufzeit abfiel, siehe Bild 6.4.13. Die Auswirkung der Erhöhung des Wassergehalts um 6 l/m^3 von 172 l/m^3 auf 178 l/m^3 Wasser auf die Verarbeitungseigenschaften führte zu einem noch weicherem Beton SVB 2.3, der erst zu einem späteren Zeitpunkt einbaubar war und zwischen 75 und 105 Minuten nach Herstellungsende selbstverdichtende Eigenschaften besaß, siehe Bild 6.4.12. Wie auch SVB 2.2 zeigte SVB 2.3 einen starken Abfall der Verarbeitbarkeit zwischen 90 und 120 Minuten. Durch die Nachdosierung von 0,2 M.-% v. z. konnte der Beton für etwa 30 Minuten ebenfalls in den optimalen Bereich zurück gebracht werden, siehe Bild 6.4.13.

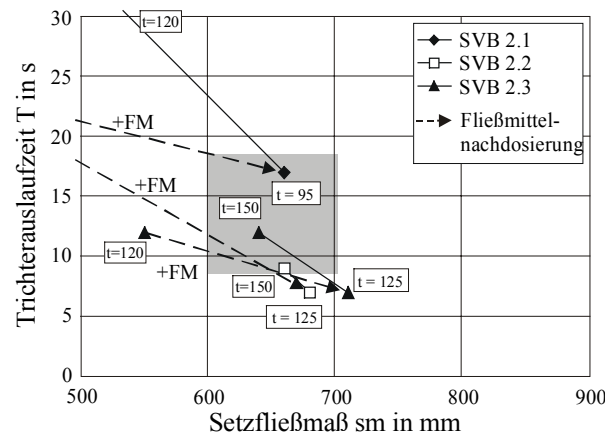


Bild 6.4.13: Einfluss der Fließmittelnachdosierung auf die Verarbeitbarkeit der Betone SVB 2.1 bis SVB 2.3

6.4.5.4 *Verarbeitbarkeitseigenschaften von SVB 3*

Bei Setzfließmaßen zwischen 600 und 750 mm sowie bei Trichterauslaufzeiten zwischen 10 und 20 Sekunden war die Mischungsstabilität für Betone der Serie SVB 3 gegeben.

Die Betone SVB 3.2 bis SVB 3.4 besaßen den optimierten Wassergehalt von 175 l/m^3 , siehe Tafel 6.4.3. Sie unterschieden sich voneinander durch eine steigende Fließmitteldosierung von 0,1 M.-% v. z.

Der Beton SVB 3.2 mit 175 l/m^3 Wasser und einer Fließmitteldosierung von 1,0 M.-% v. z. war nach der Herstellung sehr weich und neigte mit einem Setzfließmaß von 810 mm und einer relativen Trichtergeschwindigkeit von 8,8 Sekunden zum Sedimentieren, siehe Bild 6.4.14. Trotzdem fiel die Verarbeitbarkeit innerhalb von 60 Minuten unter die Verarbeitbarkeitsgrenze ab. Optimale selbstverdichtende Eigenschaften besaß der Beton dabei zwischen 20 und 40 Minuten nach Mischungsende. Eine Nachdosierung von 0,2 M.-% Fließmittel nach 60 Minuten brachte den Beton fast wieder in sein Anfangsfließverhalten zurück, siehe Bild 6.4.16. Nach einer kurzen Übergangszeit von rund 15 Minuten erreichte der Beton dann optimale selbstverdichtende Eigenschaften für weitere 70 Minuten.

Durch die gegenüber SVB 3.2 erhöhte Fließmitteldosierung konnte die Verarbeitbarkeitszeit der Betone SVB 3.3 und 3.4 deutlich verlängert werden. Entsprechend des höheren Fließmittelgehalts waren sie wegen ihrer anfänglicher Entmischungsneigung erst zu späteren Zeitpunkten einbaubar (SVB 3.3 nach rund 30 und SVB 3.4 nach rund 45 Minuten). Danach wiesen sie jedoch eine ausreichend lange Verarbeitbarkeitszeit von 120 bzw. 180 Minuten auf, siehe Bild 6.4.14.

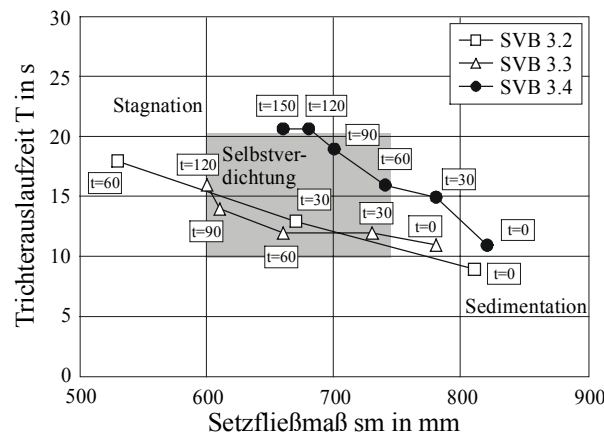


Bild 6.4.14: Verlauf der Verarbeitbarkeit der Betone SVB 3.2 bis SVB 3.4

SVB 3.1, dem im Vergleich zu SVB 3.2 7 l/m^3 weniger Wasser zugegeben wurde, siehe Tafel 6.4.3, zeigte ein erhebliches Ansteifen und einen noch schnelleren Abfall der Verarbeitbarkeit, siehe Bild 6.4.15. Durch die geringere Wasserfilmdicke und durch die neu gebildeten Oberflächen infolge der Anfangsreaktionen des Zements wurde die Wirkungsdauer des Fließmittels eingeschränkt. Durch eine Nachdosierung von $0,2 \text{ M.-% v. z}$ nach 30 Minuten konnte das Mehlkorn wieder dispergiert werden, siehe Bild 6.4.16. Es zeigte sich, dass in diesem Fall die Nachdosierung etwas zu hoch gewählt war, denn SVB 3.1 neigte für rund 40 Minuten zum Sedimentieren. Danach besaß der Beton für weitere 40 Minuten selbstverdichtende Eigenschaften.

SVB 3.5 mit einem im Vergleich zu SVB 3.2 um 7 l/m^3 erhöhten Wassergehalt zeigte wegen des erhöhten Wassergehalts von 182 l/m^3 eine höhere Fließfähigkeit. Der Beton erreichte 30 Minuten nach Mischungsende den Bereich für Selbstverdichtung. Danach wies er für eine volle Stunde die für Selbstverdichtung optimale Verarbeitbarkeit auf, siehe Bild 6.4.15. Eine Nachdosierung von $0,2 \text{ M.-%}$ Fließmittel im Alter von 120 Minuten brachte SVB 3.5 ebenfalls wieder in sein Anfangsfließverhalten zurück und sorgte für eine weitere Verarbeitbarkeitszeit von 2 Stunden, siehe Bild 6.4.16.

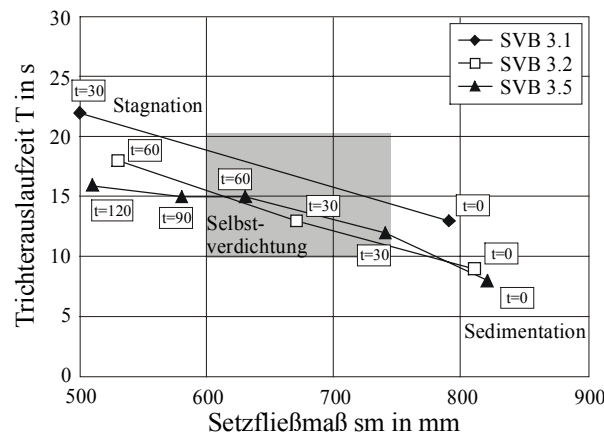


Bild 6.4.15: Verlauf der Verarbeitbarkeit der Betone SVB 3.1, SVB 3.2 und SVB 3.5

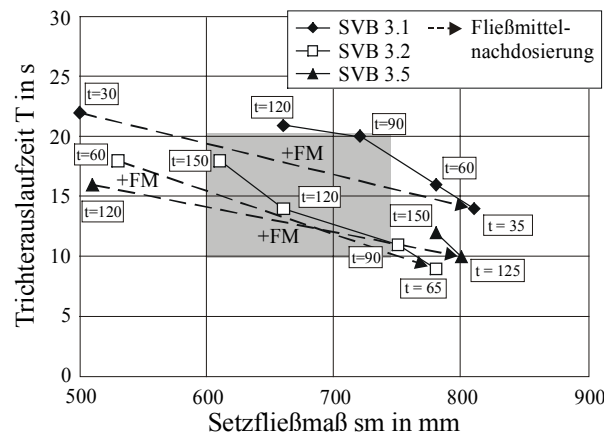


Bild 6.4.16: Einfluss der Fließmittelnachdosierung auf die Verarbeitbarkeit der Betone SVB 3.1, SVB 3.2 und SVB 3.5

6.4.5.5 Verarbeitbarkeitseigenschaften von SVB 4

Aus der Kombination der Frisch- und Festbetonprüfungen konnte ein Bereich abgeleitet werden, in dem die Betone der Serie SVB 4 selbstverdichtende Eigenschaften aufwiesen: Bei Setzfließmaßen über 810 mm oder Trichterauslaufzeiten unter 12 Sekunden war die Mischungsstabilität der hier untersuchten Betone nicht immer gegeben. Lagen die Werte für das Setzfließmaß unter 700 mm und die Trichterauslaufzeit über 22 Sekunden, war die Selbstentlüftung der Betone nicht mehr ausreichend.

Die Betone SVB 4.1 bis SVB 4.4 wiesen den optimierten Wassergehalt von 168 l/m³ auf, siehe Tafel 6.4.4. Sie unterschieden sich voneinander durch eine steigende Fließmitteldosierung um jeweils 0,1 M.-% v. z. von 0,8 bis 0,9 M.-% v. z.

SVB 4.1 mit einem Fließmittelgehalt von 0,8 M.-% v. z zeigte nach der Herstellung keine ausreichenden Verarbeitbarkeitseigenschaften, siehe Bild 6.4.17. Die Fließmitteldosierung lag noch unterhalb der Sättigungsdosierung, was im Vergleich mit den anderen Betonen der Serie SVB 4 neben dem geringeren Setzfließmaß im besonderen an der hohen Trichterauslaufzeit zu erkennen war. Trotz des optimalen Wassergehalts war noch so viel Wasser in Agglomeraten der mehlfeinen Stoffe rheologisch unwirksam gebunden, dass der Beton 30 Sekunden benötigte, um auszufließen. Erst durch eine zweimalige Fließmittelnachdosierung von jeweils 0,2 M.-% v. z konnten selbstverdichtende Eigenschaften für 30 Minuten eingestellt werden. Die Erhöhung der anfänglichen Fließmitteldosierung um 0,1 M.-% v. z auf 0,9 M.-% v. z bei SVB 4.2 brachte eine ausreichende Dispergierung des Mehlkorns. Dieser Beton besaß die ersten 20 Minuten nach Mischungsende selbstverdichtende Eigenschaften. Jedoch war die Wirkung des Fließmittel zeitlich stark begrenzt, so dass es zu einer starken Reagglomeration kam, die im Wesentlichen die Trichterauslaufzeit stark beeinflusste. Eine Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% v. z nach 60 Minuten führte zur Wiederherstellung der selbstverdichtenden Eigenschaften für weitere 30 Minuten in der Größe der Verarbeitbarkeit direkt nach Mischungsende, siehe Bild 6.4.19. Da auch die Trichterauslaufzeit durch die erneute Dispergierung den Ausgangswert erreichte, kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass der Beton den gleichen Wassergehalt nach 60 Minuten wie zum Zeitpunkt des Mischungsendes besaß.

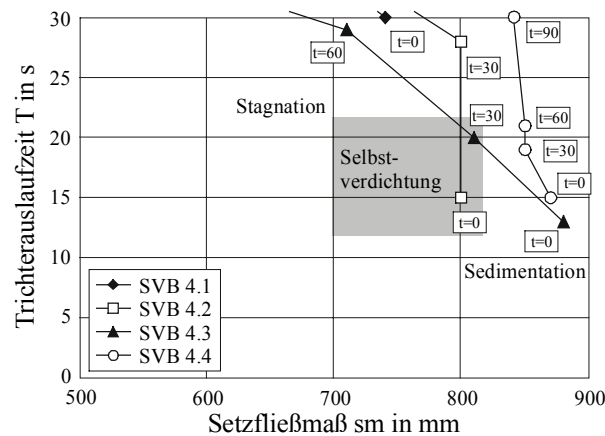


Bild 6.4.17: Verlauf der Verarbeitbarkeit der Betone SVB 4.1 bis SVB 4.4

Durch einer weiteren Steigerung des Fließmittelgehalts auf 1,0 M.-% v. z bei SVB 4.3 konnte das Setzfließmaß noch einmal vergrößert werden, während sich die Trichterauslaufzeit kaum veränderte, siehe Bild 6.4.17. SVB 4.3 besaß selbstverdichtende Eigenschaften zwischen 30 und 60 Minuten nach Mischungsende. Die Erhöhung des Fließmittelgehalts führte zu einer zeitlichen Verschiebung der selbstverdichtenden Eigenschaften zu späteren Zeitpunkten hin. Jedoch war auch hier der Verarbeitbarkeitsverlust infolge einer stark ansteigenden Trichterauslaufzeit am größten.

Durch eine Fließmitteldosierung von 1,1 M.-% v. z bei SVB 4.4 konnten die Verarbeitbarkeitseigenschaften im Vergleich zu SVB 4.3 nicht weiter verbessert werden. Zwar konnten die Trichterausfließzeiten über 60 Minuten im benötigten Rahmen gehalten werden. Dafür zeigten die zugehörigen Setzfließmaße zu große Werte von über 810 mm. Als das Setzfließmaß den für Selbstverdichtung erforderlichen Bereich nach ca. 70 Minuten erreichte, war die Trichterausfließzeit so hoch, dass keine Selbstentlüftung mehr gegeben war.

SVB 4.5 und SVB 4.6 besaßen einen im Vergleich zum optimalen Wassergehalt um 7 l/m³ erhöhten Wassergehalt von 175 l/m³, siehe Tafel 6.4.4. SVB 4.5 zeigte im Vergleich zu SVB 4.1 mit gleichem Fließmittelgehalt etwas verbesserte Fließeigenschaften unmittelbar nach dem Mischungsende, siehe Bild 6.4.18. Trotz des erhöhten Wassergehalts bewegte sich der Verarbeitbarkeitsverlust im gleichen Rahmen. Durch eine Fließmittelnachdosierung in Höhe von 0,2 M.-% v. z nach 30 Minuten konnten die selbstverdichtenden Eigenschaften für weitere 30 Minuten wiederhergestellt werden, siehe Bild 6.4.19.

SVB 4.6 mit einem Fließmittelgehalt von 0,9 M.-% v. z bei einem Wassergehalt von 175 l/m³ besaß zwischen 20 und 50 Minuten nach Mischungsende selbstverdichtende Eigenschaften. Jedoch war der Verarbeitbarkeitsverlust hier ebenfalls sehr ausgeprägt, siehe Bild 6.4.18. Durch eine Fließmittelnachdosierung in Höhe von 0,2 M.-% v. z nach 90 Minuten konnten die selbstverdichtenden Eigenschaften für weitere 30 Minuten wiederhergestellt werden, siehe Bild 6.4.19.

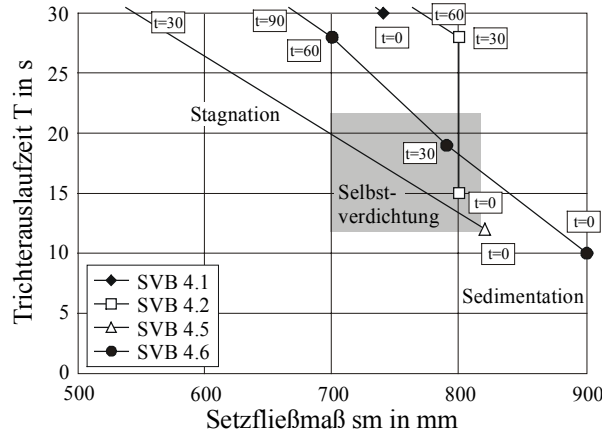


Bild 6.4.18: Verlauf der Verarbeitbarkeit der Betone SVB 4.1 und SVB 4.2 sowie SVB 4.5 und SVB 4.6

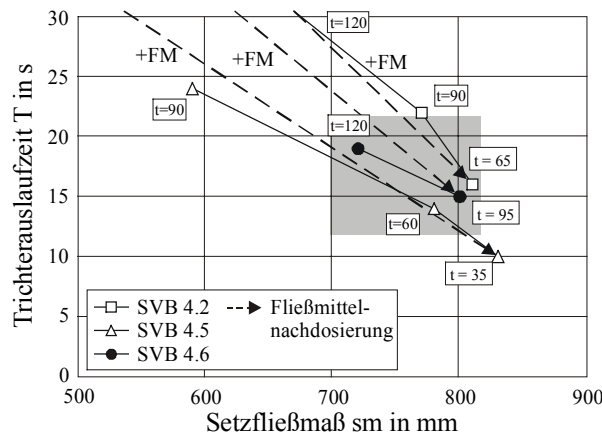


Bild 6.4.19: Einfluss der Fließmittelnachdosierung auf die Verarbeitbarkeit der Betone SVB 4.2, SVB 4.5 und SVB 4.6

Die weitere Erhöhung der Fließmitteldosierung hätte bei dem erhöhten Wassergehalt von 175 l/m³ zum gleichen Verlauf wie bei SVB 4.4 geführt. Die Verbes-

serung der Trichterauslaufzeit wäre durch zu große Setzfließmaße im entscheidenden Zeitrahmen aufgehoben worden.

6.4.5.6 *Verarbeitbarkeitseigenschaften von SVB 5*

Die Betone der Serie SVB 5 wiesen selbstverdichtende Eigenschaften bei Setzfließmaßen zwischen 690 und 810 mm sowie Trichterauslaufzeiten zwischen 7 und 15 Sekunden auf.

Der Beton SVB 5.1 mit optimiertem Wassergehalt von 173 l/m³, siehe Tafel 6.4.4 zeigte ähnliche Verarbeitbarkeitseigenschaften wie der Beton SVB 4.5. Unmittelbar nach Mischungsende fiel die Verarbeitbarkeit stark ab, so dass selbstverdichtende Eigenschaften nur zwischen 10 und 20 Minuten nach Mischungsende vorlagen, siehe Bild 6.4.20. Durch eine Fließmittelnachdosierung in Höhe von 0,4 M.-% v. z nach 30 Minuten, die mit einer Fließmittelnachdosierung von 0,2 M.-% des Fließmittels PCE 2 vergleichbar war, konnten die selbstverdichtenden Eigenschaften für weitere 40 Minuten wiederhergestellt werden, siehe Bild 6.4.21.

In Beton SVB 5.2 wurde der Fließmittelgehalt um 0,2 auf 2,4 M.-% v. z erhöht. Dieser Beton neigte nach dem Mischungsende zum Sedimentieren. 30 Minuten nach Mischungsende besaß der Beton für 30 Minuten selbstverdichtende Eigenschaften, siehe Bild 6.4.20. Eine Fließmittelnachdosierung nach 90 Minuten in Höhe von 0,4 M.-% v. z brachte den Beton wieder nahezu in die Anfangsfließfähigkeit zurück und sorgte für weitere 40 Minuten für selbstverdichtenden Eigenschaften, siehe Bild 6.4.21.

SVB 5.3 enthielt einen, auf den optimalen Wassergehalt bezogenen, um 7 l/m³ erhöhten Wassergehalt. Im Vergleich zu SVB 5.1 mit gleichem Fließmittelgehalt wurde das anfängliche Fließverhalten kaum beeinflusst. Der Beton besaß nach etwa 15 Minuten für 30 weitere Minuten selbstverdichtende Eigenschaften, siehe Bild 6.4.20. Durch eine Fließmittelnachdosierung in Höhe von 0,4 M.-% v. z nach 60 Minuten konnten selbstverdichtende Eigenschaften für weitere 40 Minuten wiederhergestellt werden, ehe die Werte für das Setzfließmaß und die Trichterauslaufzeit den Bereich für die Selbstverdichtung verließen, siehe Bild 6.4.21. Eine höhere Fließmitteldosierung bei erhöhtem Wassergehalt von 180 l/m³ hätte, wie bei Beton SVB 4.4, zu einem zum Sedimentieren neigendem Beton geführt, der, wenn überhaupt, nur zu späten Zeitpunkten einbaubar gewesen wäre.

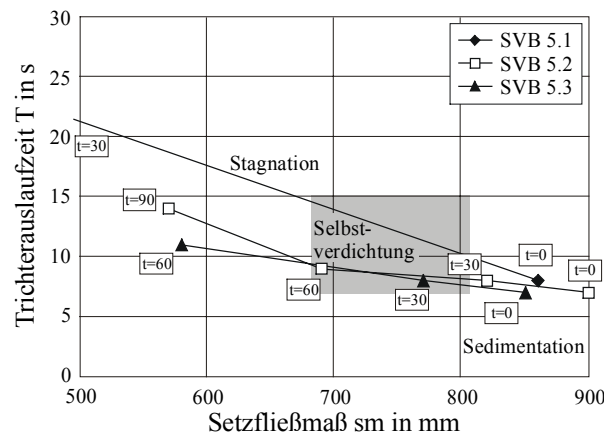


Bild 6.4.20: Verlauf der Verarbeitbarkeit der Betone SVB 5.1 bis SVB 5.3

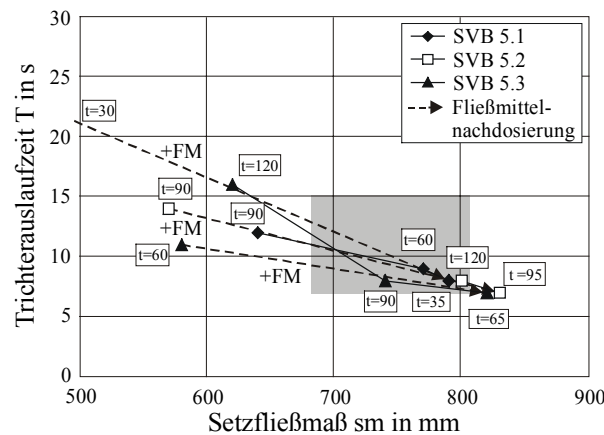


Bild 6.4.21: Einfluss der Fließmittelnachdosierung auf die Verarbeitbarkeit der Betone SVB 5.1 bis SVB 5.3

6.4.6 Zusammenfassung

Durch die Kombination von Frisch- und Festbetonuntersuchungen konnten für die untersuchten Betone Verarbeitbarkeitsbereiche für selbstverdichtende Eigenschaften, Stagnation und Sedimentation in Abhängigkeit des Wasser- und Fließmittelgehalts ermittelt werden. Ebenso waren die zeitlichen Verläufe der verschiedenen Bereiche quantifizierbar.

Die Betone der Serien SVB 1 und SVB 2 in der Kombination Z I.2/KM5 erreichten geringe Setzfließmaße bei einer generell geringen Trichterauslaufzeit.

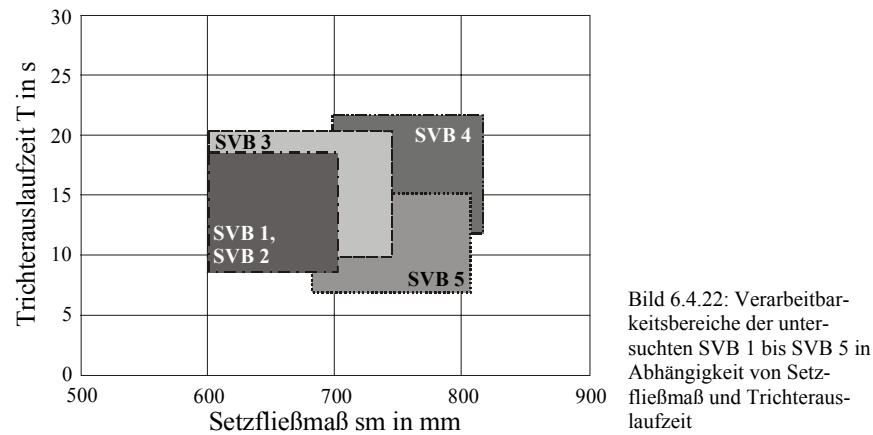
Eine Verringerung des Wassergehalts führte nicht zu einer Verringerung der Trichterauslaufzeit, sondern auch bei höheren Fließmittelgehalten zum frühen Verlust der Verarbeitbarkeit. Fließmittelnachdosierungen brachten die Betone in den verarbeitungsfähigen Bereich zurück. Jedoch folgte in der Regel nach weiteren 30 Minuten erneut ein steiler Verarbeitbarkeitsabfall. Wie auch schon die Mörtelversuche im Abschnitt 6.3 zeigten, erwies sich die Steuerung der Verarbeitbarkeit mit diesen Ausgangsstoffen aufgrund des zeitlich begrenzten Korridors für Selbstverdichtung als schwierig.

Der Beton SVB 3 in der Kombination Z III.1/FA1 erreichte nach Mischungsende Setzfließmaße um 800 mm bei Trichterauslaufzeiten um 10 Sekunden. Die Fließmittelzugabe zwischen 1,0 M.-% und 1,2 M.-% v. z. bei optimaler Wasserdosierung ermöglichte die sehr genaue zeitliche Steuerung der Verarbeitbarkeitseigenschaften. Dadurch vergrößerte sich aber das Setzfließmaß über einen längeren Zeitraum, so dass die Betone erst zu späten Zeitpunkten nach Mischungsende sedimentationsstabil einbaubar wurden. Abweichungen vom optimalen Wassergehalt führten zum Verlust der Verarbeitbarkeit, die sich jedoch durch eine gezielte Fließmittelnachdosierung wiederherstellen ließ. Die dabei benötigte Menge war im Vergleich zu den Betonen SVB 1 und SVB 2 geringer.

Die Betone der Serien SVB 4 und SVB 5 in der Kombination Z III.2/FA2 erreichten relativ große Setzfließmaße in Kombination mit höheren Trichterauslaufzeiten. Insgesamt zeigten die Betone einen überproportionalen Verarbeitbarkeitsverlust infolge des Anstieges der Trichterauslaufzeit. Höhere Fließmitteldosierungen konnten diesen Effekt zum Teil vermindern. Fließmittelnachdosierungen brachten die Betone in den verarbeitungsfähigen Bereich zurück. Jedoch folgte in der Regel erneut ein steiler Verarbeitbarkeitsabfall. Trotzdem wiesen die Betone nach der Nachdosierung für 40 Minuten selbstverdichtende Eigenschaften auf. Die Untersuchungen an den Betonen SVB 5 mit PCE 4 zeigten die selben Tendenzen wie die Untersuchungen an den Betonen SVB 4 mit PCE 2. Im Vergleich veränderten sich jedoch die Trichterausfließzeiten der Betone SVB 5 mit PCE 4 trotz des höheren Zementgehalts nicht so stark und damit günstiger.

In Bild 6.4.22 sind die Verarbeitbarkeitsbereiche der fünf selbstverdichtenden Betone dargestellt. Sie unterscheiden sich durch die mehlfeinen Stoffe, die Zusammensetzung und durch Ausgangsstoffe unterschiedlicher Hersteller. Dieses Bild verdeutlicht die unterschiedlichen Bereiche für optimale selbstverdichtende Eigenschaften verschiedener selbstverdichtender Betone. Zu erkennen ist, dass die Verarbeitbarkeitsbereiche um den von Okamura angegebenen Kennwert für Selbstverdichtung von Setzfließmaß von rund 700 mm und Trichterauslaufzeit

von rund 15 s schwanken. Die genaue Lage und die Größe des jeweiligen Verarbeitbarkeitsfensters hängt jedoch stark von den verwendeten Ausgangsstoffen und ihrer Kombination ab. Hervorzuheben sind z. B. die Fenster für SVB 3 und für SVB 4. SVB 3 zeigt optimale selbstverdichtende Eigenschaften bei Setzfließmaßen zwischen 600 und 750 mm in Kombination mit Trichterauslaufzeiten von 10 bis 20 Sekunden. SVB 4 dagegen, der in Art und Gehalt der mehlfeinen Stoffe identisch ist, jedoch Ausgangsstoffe anderer Hersteller enthält, zeigt optimale selbstverdichtende Eigenschaften bei Setzfließmaßen zwischen 700 und 820 mm sowie Trichterauslaufzeiten von 12 bis 22 Sekunden.



Die Ergebnisse zeigen auf der einen Seite, dass durch gezielte Wasser- und Fließmittelgehalte die Verarbeitbarkeitseigenschaften zeitlich sehr genau gesteuert werden können. Auf der anderen Seite untermauern die Ergebnisse, dass Schwankungen der Wasser- und Fließmittelgehalte sehr genau beherrscht und beobachtet werden müssen.

6.5 Einfluss der Temperatur auf die Verflüssigung

6.5.1 Allgemeines

Neben den Wasser- und Fließmittelgehalten hat die Temperatur einen großen Einfluss auf die Verflüssigung und die Verarbeitbarkeitseigenschaften. Um diesen Einfluss darstellen zu können, wurden an selbstverdichtenden Mörteln analog zu Abschnitt 6.3 und an selbstverdichtenden Betonen nach Abschnitt 6.4

Untersuchungen zum Fließverhalten in unterschiedlichen Temperaturbereichen durchgeführt. Es wurden die Prüftemperaturen 8, 20 und 30 °C gewählt.

6.5.2 Einfluss der Temperatur auf die Verflüssigung selbstverdichtender Mörtel

Für die Untersuchungen wurde der Zement ZIII.2, die Flugasche FA2, Rheinsand der Fraktion 0/2, Trinkwasser aus dem Leitungsnetz der Stadt Düsseldorf und das Fließmittel PCE 4 verwendet. Die Mörtel waren so zusammengesetzt, dass sie dem Mörtel des selbstverdichtenden Betons SVB 5 entsprachen. Durch das große Leim- und Sandvolumen selbstverdichtender Betone wurden damit rund 65 % des SVB 5 abgedeckt. Die Zusammensetzungen der Mörtel sind in Tafel 6.5.1 dargestellt. Die Mörtel wurde mit vier verschiedenen Fließmittelgehalten hergestellt. Der Wasseranteil der Fließmittel wurde auf den Gesamtwassergehalt angerechnet. Der Wassergehalt entsprach dem optimalen Wassergehalt von 173 l/m³. Die Ausgangsstoffe wurden vortemperiert. Die Mörtel wurden in einem klimatisierten Labor der jeweiligen Prüftemperatur hergestellt und geprüft.

Tafel 6.5.1: Zusammensetzungen der untersuchten selbstverdichtenden Mörtel

Schlüsselnummer		ZF08				ZF20				ZF30			
Temperatur	°C	8				20				30			
ZIII.2	g	1635				1635				1635			
w	g	1047				1047				1047			
FA2	g	1695				1695				1695			
g 0/2	g	4029				4029				4029			
LP	Vol.-%	2,0				2,0				2,0			
PCE 4	M.-% v. z	2,0	2,2	2,4	2,6	2,0	2,2	2,4	2,6	2,0	2,2	2,4	2,6
Vges	dm ³	4,0				4,0				4,0			

Nach der Herstellung wurde das zeitabhängige Fließverhalten der Mörtel mit dem Mörtelsetzfließmaß und der Mörtelauflaufzeit gemäß Abschnitt 6.3.4 untersucht. Zusätzlich wurden analog zu Abschnitt 6.3.5 zylinderförmige Probekörper zur optischen Charakterisierung des Gefüges hergestellt. Die ermittelten Kenngrößen der Setzfließmaße und der Trichterauflaufzeiten in Abhängigkeit

von der Fließmitteldosierung, der Zeit und der Temperatur der selbstverdichtenden Mörtel ZF sind in den Tafeln F.1 bis F.3, Anhang F, zusammengestellt. Die Verarbeitbarkeitseigenschaften lassen sich, wie in Abschnitt 6.3 abgeleitet, in Verarbeitbarkeitsbereichen darstellen. Durch den Abgleich der rheologischen Ersatzkenngrößen mit den zu den gleichen Zeitpunkten hergestellten Probekörpern konnte der Verarbeitbarkeitsbereich für selbstverdichtende Eigenschaften für den Mörtel ZF ermittelt werden. Die Mörtel besaßen unabhängig von der Temperatur selbstverdichtende Eigenschaften, wenn das Setzfließmaß zwischen 190 und 290 mm und die Trichterauslaufzeit zwischen 6 und 12 Sekunden lag.

Die Bilder 6.5.1 bis 6.5.3 fassen die Ergebnisse zur Ermittlung des zeitabhängigen Verarbeitbarkeitsverhaltens zusammen und zeigen die Zeiträume nach Mischungsende, in denen der Mörtel in Abhängigkeit vom Fließmittelgehalt und der Temperatur selbstverdichtende Eigenschaften aufwies. Zu sehen ist, dass sich die Zeitfenster für die Selbstverdichtung mit abnehmender Temperatur vergrößerten. Bei höheren Fließmitteldosierungen neigten die Mörtel überproportional länger zum Sedimentieren, ehe sie den Bereich für Selbstverdichtung erreichten. Daraus kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die durch die Temperatur beeinflussten unterschiedlichen Reaktionsgeschwindigkeiten zwischen Zement, Zusatzstoff und Fließmittel zu unterschiedlichen Fließmittelpots führen, die eine längere bzw. kürzere Verarbeitbarkeit des Mörtels gewährleisten und damit maßgeblich den Verarbeitbarkeitszeitraum beeinflussen. Dies kann dazu führen, dass eine Fließmitteldosierung von z. B. 2,4 M.-% v. z im Temperaturbereich von 20 bis 30 °C zu einem Verarbeitbarkeitszeitraum von 20 bis 70 Minuten führt, in dieser Zeit aber starkes Sedimentieren im Temperaturbereich um 10 °C auftritt.

Die Überlagerung der verschiedenen Bereiche für selbstverdichtende Eigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur und der Fließmitteldosierung ist zur besseren Vergleichbarkeit in Bild 6.5.4 dargestellt.

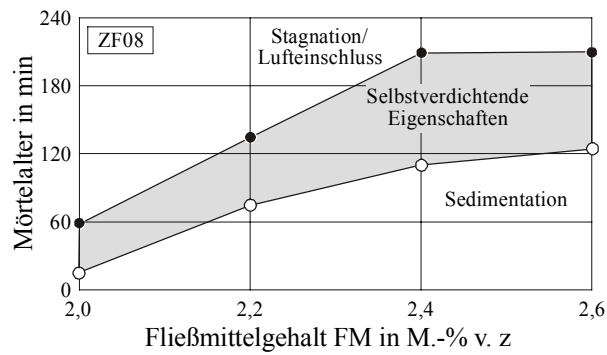


Bild 6.5.1: Zeitlicher Verlauf der Verarbeitbarkeit von Mörtel ZF08 in Abhängigkeit der Fließmitteldosierung bei 8 °C

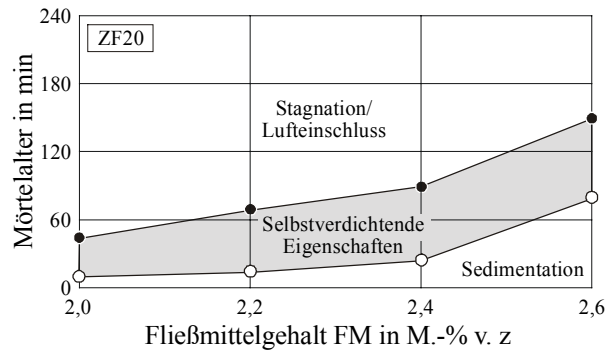


Bild 6.5.2: Zeitlicher Verlauf der Verarbeitbarkeit von Mörtel ZF20 in Abhängigkeit der Fließmitteldosierung bei 20 °C

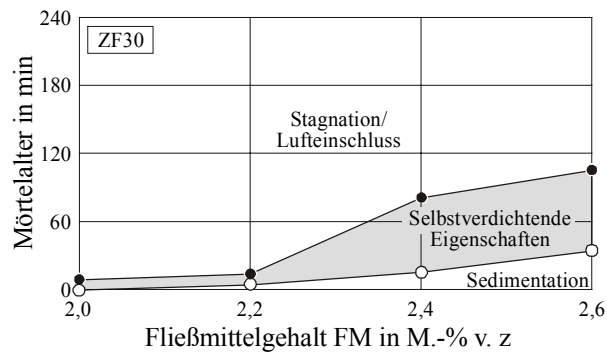


Bild 6.5.3: Zeitlicher Verlauf der Verarbeitbarkeit von Mörtel ZF30 in Abhängigkeit der Fließmitteldosierung bei 30 °C

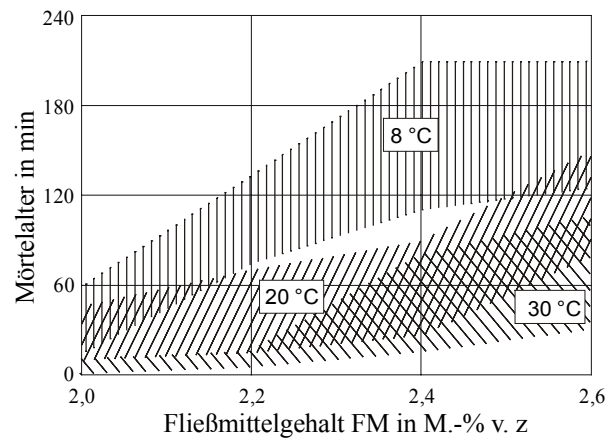


Bild 6.5.4: Zeitlicher Verlauf der Verarbeitbarkeit der Mörtel ZF in Abhängigkeit von der Fließmitteldosierung und der Temperatur

6.5.3 Einfluss der Temperatur auf die Verarbeitbarkeit selbstverdichtender Betone

Aufbauend auf den Mörteluntersuchungen wurde der Einfluss der Temperatur auf die Verarbeitbarkeitseigenschaften selbstverdichtender Betone der Serie SVB 5 durchgeführt. Als Referenzbeton wurde SVB 5.2 gewählt. Die Zusammensetzungen der Betone sind in Tafel 6.5.2 dargestellt. Die Ausgangsstoffe wurden so vortemperiert, dass die Betone ebenfalls Frischbetontemperaturen von ca. 8, 20 und 30 °C besaßen.

Tafel 6.5.2: Zusammensetzungen der selbstverdichtenden Betone

Schlüsselnummer		SVB 5.2-08	SVB 5.2-20	SVB 5.2-30	SVB 5.4-30
Temperatur	°C	8	20	30	30
ZIII.2	kg/m ³	270	270	270	270
w	kg/m ³	173	173	173	173
FA2	kg/m ³	280	280	280	280
g	kg/m ³	1561	1561	1561	1561
PCE 4	M.-% v. z.	2,4	2,4	2,4	2,8
LP	V.-%	1,5	1,5	1,5	1,5

Die Verarbeitbarkeitseigenschaften der selbstverdichtenden Betone wurden gemäß Abschnitt 6.4.3 überprüft. Die zugehörigen Werte Setzfließmaß s_m und Trichterauslaufzeit T in Abhängigkeit von der Temperatur und von der Zeit sind in der Tafel F.4, Anhang F, aufgeführt.

Die Betone der Serie SVB 5 wiesen bei einer Prüftemperatur von 20 °C selbstverdichtende Eigenschaften bei Setzfließmaßen zwischen 690 und 810 mm sowie Trichterauslaufzeiten zwischen 7 und 15 Sekunden auf, siehe Abschnitt 6.4.5.6. Die Bilder 6.5.5 bis 6.5.7 fassen die Ergebnisse zur Ermittlung des zeitabhängigen Verarbeitbarkeitsverhaltens zusammen, und zeigen die Zeiträume nach Mischungsende, in denen die Betone in Abhängigkeit von der Temperatur selbstverdichtende Eigenschaften aufwiesen.

SVB 5.2-20 mit einem Fließmittelgehalt von 2,4 M.-% v. z neigte nach dem Mischungsende zum Sedimentieren. 30 Minuten später besaß der Beton selbstverdichtende Eigenschaften, die er für weitere 30 Minuten beibehielt, siehe Bild 6.5.5.

Bei einer Prüftemperatur von 8 °C zeigte SVB 5.2-08 eine veränderte zeitabhängige Verarbeitbarkeit, siehe Bild 6.5.5. Der Beton verweilte nach Mischungsende länger im instabilen Bereich. Zwischen 40 und 75 Minuten nach Mischungsende besaß SVB 5.2-08 selbstverdichtende Eigenschaften.

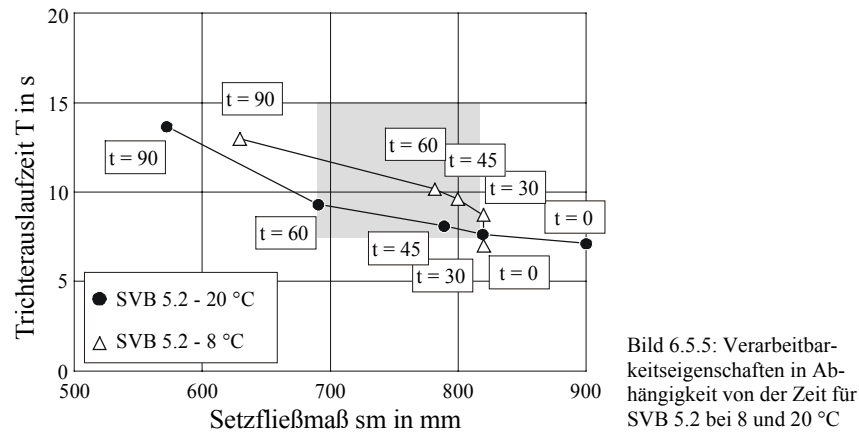


Bild 6.5.5: Verarbeitbarkeitseigenschaften in Abhängigkeit von der Zeit für SVB 5.2 bei 8 und 20 °C

Die Erhöhung der Temperatur auf 30 °C führte bei SVB 5.2-30 zu einem sehr schnellen Verarbeitbarkeitsverlust, siehe Bild 6.5.6. Eine doppelte Nachdosierung von 2 x 0,2 M.-% v. z brachte den Beton in den optimalen Bereich zurück und sorgte für selbstverdichtende Eigenschaften von rund einer Stunde.

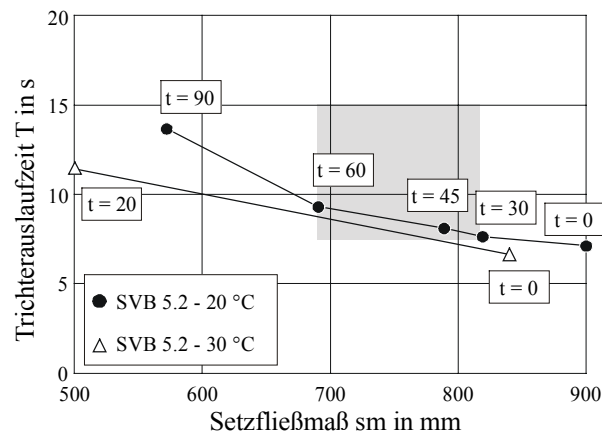


Bild 6.5.6: Verarbeitbarkeitseigenschaften in Abhängigkeit von der Zeit für SVB 5.2 bei 20 und 30 °C

SVB 5.4-30 mit einer Fließmitteldosierung von 2,8 M.-% v. z., die der Gesamtdosierung von SVB 5.2-30 nach der Nachdosierung entsprach, besaß unmittelbar nach dem Mischungsende die Ausgangsverarbeitbarkeit von SVB 5.2-20. Er erreichte nach etwa 20 Minuten den Bereich der Verarbeitbarkeit für Selbstverdichtung und wies bis 80 Minuten nach Mischungsende selbstverdichtende Eigenschaften auf, siehe Bild 6.5.7.

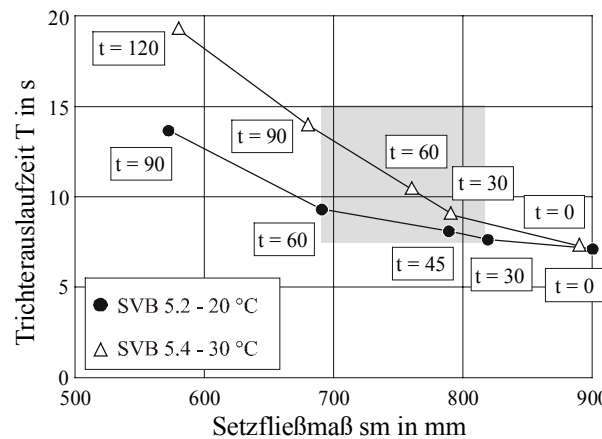


Bild 6.5.7: Verarbeitbarkeitseigenschaften in Abhängigkeit von der Zeit für SVB 5.2 bei 20 °C und 5.4 bei 30 °C

Analog zu den Mörtelprüfungen zeigte sich, dass mit abnehmender Temperatur der Beton bei gleichem Fließmittelgehalt länger zum Sedimentieren neigte, ehe er den Bereich für Selbstverdichtung erreichte, siehe Bild 6.5.5. Der Verarbeit-

barkeitszeitraum, in dem SVB 5.2-08 selbstverdichtende Eigenschaften besaß, betrug wie bei SVB 5.2-20 rund 30 Minuten. Die Temperaturerhöhung auf 30 °C führte zu einer Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit im Beton, so dass die Verarbeitbarkeit in 20 Minuten fast schlagartig abfiel. Durch die Erhöhung der Fließmitteldosierung auf 2,8 M.-% v. z konnte bei SVB 5.4-30 ein entsprechender Verarbeitbarkeitsverlauf eingestellt werden.

6.5.4 Zusammenfassung

Die Betonversuche bestätigten das in den Mörtelversuchen gefundene Verhalten, dass die durch die Temperatur beeinflussten unterschiedlichen Reaktionsgeschwindigkeiten zwischen Zement, Zusatzstoff und Fließmittel zu unterschiedlichen Fließmitteldépôts führen, die eine längere bzw. kürzere Verarbeitbarkeit des Betons gewährleisten und damit maßgeblich den Verarbeitbarkeitszeitraum beeinflussen. Bei den Betonen war der Einfluss der höheren Temperaturen auf die Verarbeitbarkeitseigenschaften ausgeprägter als bei den Mörteln. Dieses Verhalten kann durch die im Vergleich erhöhte Gesteinskörnungsoberfläche und das größere Temperaturreervoir der groben Gesteinskörnungen erklärt werden.

7 Modifizierter Mischungsentwurf

7.1 Allgemeines

Die Untersuchungen zur Mehlkornoptimierung in Abschnitt 5 und zur Verflüssigung in Abschnitt 6 verdeutlichen die enorme Vielfalt in der Zusammensetzung selbstverdichtender Betone. In Abhängigkeit der Ausgangsstoffe zeigen sie unterschiedliche rheologische Eigenschaften. Der Begriff Selbstverdichtung beschreibt somit eine Frischbetoneigenschaft, die auf vielfältige Weise mit unterschiedlichen Betonausgangsstoffen und Zusammensetzungen erreicht werden kann. Die jeweilige Anwendung des Betons wie die Verwendung im Fertigteilwerk oder als Transportbeton, die Art und Form des Bauteils sowie zu berücksichtigende Expositionsklassen bestimmen den Mindestzementgehalt, das Leimvolumen, den notwendigen Verarbeitbarkeitszeitraum und die Zusammensetzung der Sieblinie.

Gerade im Hinblick auf die allgemeine Anwendung, Herstellung und Verarbeitung von SVB ist diesem Umstand Rechnung zu tragen. Feste Grenzwerte für Frischbetoneigenschaften und Empfehlungen für Verarbeitbarkeitsklassen können nur einen Teil der selbstverdichtenden Betone erfassen und sind wenig zweckmäßig. Daher bedarf es eines individuellen Konzeptes zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit selbstverdichtender Betone in Abhängigkeit von den jeweiligen Anforderungen und den vorhandenen Ausgangsstoffen um sicherzustellen, dass der Beton ausreichend fließt, entlüftet und ein homogenes Gefüge aufweist. Der aus den durchgeführten Untersuchungen entwickelte modifizierte Mischungsentwurf eignet sich, um für alle Formen des selbstverdichtenden Betons einheitliche Regeln und Bewertungsmaßstäbe zu setzen und die Verarbeitbarkeitseigenschaften zielsicher zu steuern. Bild 7.1.1 zeigt den modifizierten Mischungsentwurf.

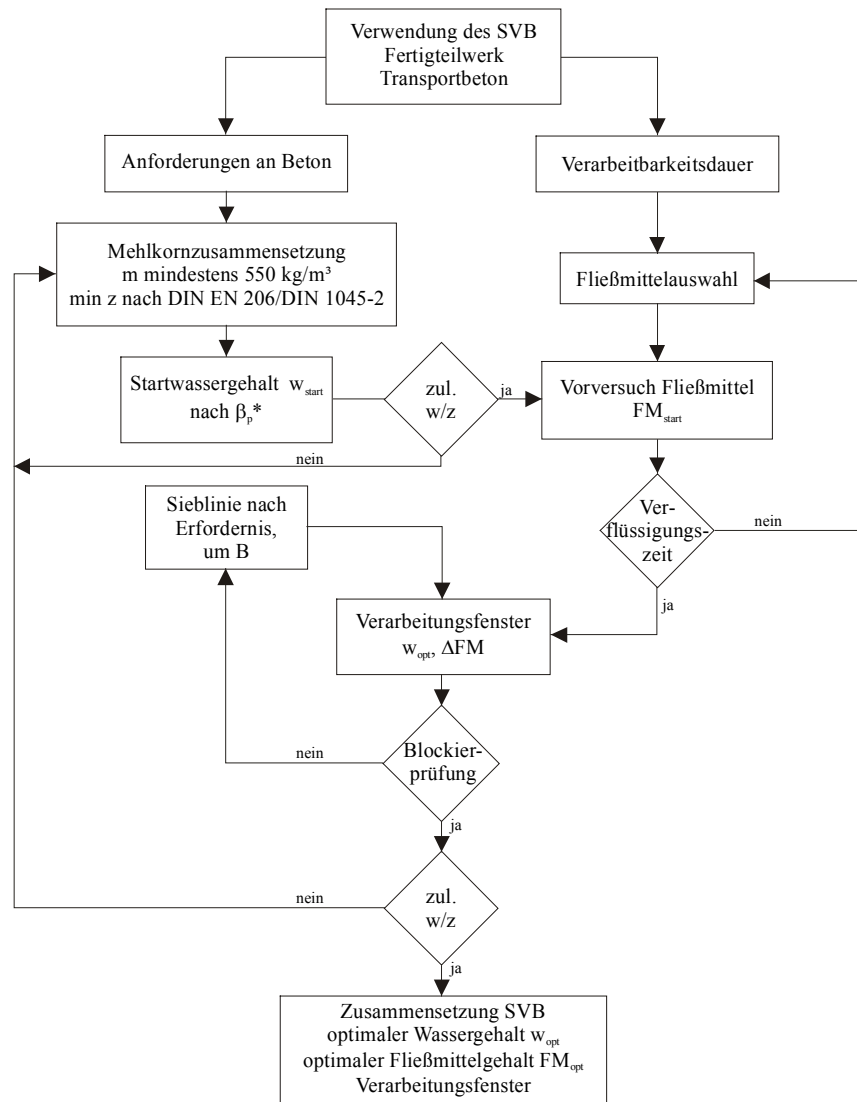


Bild 7.6.1: Modifizierter Mischungsentwurf zur Herstellung und Verwendung selbstverdichtender Betone

7.2 Festlegung der Mischungszusammensetzung

Entsprechend der Rezepturfestlegung herkömmlicher Betone müssen alle normativen Vorgaben bei der Zusammensetzung berücksichtigt werden. Hier sind vor allem der Mindestzementgehalt und der höchstzulässige Wassergehalt zu nennen. Da der Wassergehalt die entscheidende Steuergröße bei der Herstellung und Verwendung von SVB ist und sich direkt aus den mehlfeinen Ausgangsstoffen ergibt, muss im ersten Schritt nach der Abschätzung des Startwassergehalts der höchstzulässige Wassergehalt überprüft und gegebenenfalls die Mehlkornzusammensetzung leicht verändert werden.

Die Sieblinie der Gesteinskörnung muss an die Erfordernisse der Einbausituation angepasst werden. Gering bewehrte Betonbauteile können mit einem leimarmen, grobkornreicheren SVB problemlos betoniert werden. Höher bewehrte Bauwerke hingegen bedürfen eines leimreicheren SVB mit optimierter Sieblinie, um das Blockieren durch grobe Gesteinskörnungen zu vermeiden.

7.3 Startwassergehalt

Die Art der mehlfeinen Stoffe Zement und Zusatzstoff und ihr Volumenverhältnis beeinflussen den optimalen Wassergehalt des SVB und die Empfindlichkeit der Frischbetoneigenschaften gegenüber Schwankungen im Wassergehalt. Ist das Mehlkornhaufwerk nicht gut abgestimmt und zu hohlraumreich, weist der daraus hergestellte SVB eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Schwankungen im Wassergehalt auf: Unterhalb des optimalen Wassergehalts ist die Verarbeitbarkeit unzureichend, während geringfügig höhere Wassergehalte nicht durch das Mehlkorn gebunden werden können und es somit zu Absetzerscheinungen kommt. Darüber hinaus bestimmt die gewählte Mehlkornkombination das Fließverhalten des Betons. Es kann von „klebrig-zäh“ bis „wässrig“ reichen.

Die in der Festlegung des Betons gewählte Mehlkornzusammensetzung kann bei Kenntnis der Ausgangssieblinien granulometrisch charakterisiert werden. Das Steigungsmaß der Sieblinie dient als Eingangsparameter zur Bestimmung des Grundwertes $\beta_{p,n}$. Unter Kenntnis der Reaktivität (volumetrischer Zementanteil der Mehlkornmischung) und der Kornform (volumetrischer Anteil runder Körnung) lässt sich dann der Startwassergehalt β_p^* für die weitere Betonoptimierung ermitteln. Bild 7.3.1 zeigt die Bestimmung von β_p^* am Beispiel von SVB 2, siehe Abschnitt 6.4.2.

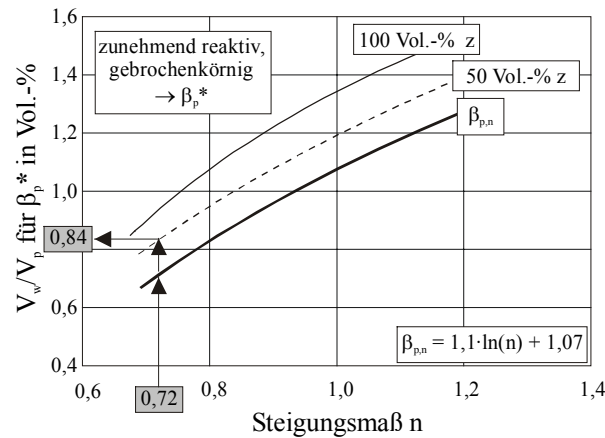


Bild 7.3.1: Bestimmung des Startwassergehalts β_p^* für ein gebrochenkörniges Kornhaufwerk mit einem Steigungsmaß von 0,72 und einem Zementvolumen von rd. 50 % (SVB 2)

7.4 Wirkungsweise des Fließmittels

Das Zusammenwirken der mehlfeinen Stoffe und des Zusatzmittels bestimmt die Verarbeitbarkeitsdauer. Sie wird stark von der Reaktivität des Zements, der Lösungszusammensetzung nach Wasserzugabe sowie der Temperatur beeinflusst. Gerade bei der Verwendung von SVB als Transportbeton spielt die Verarbeitbarkeitsdauer eine herausragende Rolle.

Die große Vielfalt von Fließmitteln auf der Wirkstoffbasis von Polycarboxylatether machen Vorversuche unerlässlich. Die Ermittlung der Sättigungsdosierungen für vollständige Dispergierung des Mehlkorns am Leim- bzw. Mörtelsystem mit verschiedenen Fließmitteln eignet sich, um Aussagen zur Wirksamkeit und Verträglichkeit der Kombinationen zu treffen, siehe 6.3.6.3. Die Sättigungsdosierung ist erreicht, wenn sich durch die weitere Zugabe von Fließmittel das Setzfließmaß nicht mehr systematisch steigern lässt, siehe Bild 7.4.1. Zudem geben sie wichtige Hinweise für die Betonoptimierung, ab welcher Dosierung die benötigten zeitlichen Verarbeitbarkeitseigenschaften über eine zusätzliche Fließmitteldosierung steuerbar werden.

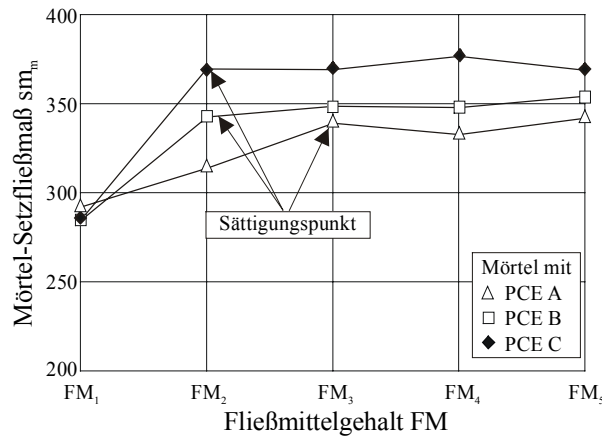


Bild 7.4.1: Schematische Darstellung der Bestimmung der Sättigungsdosierungen am Mörtelsystem

7.5 Fensterlösung

In Frisch- und Festbetonprüfungen kann der optimale Verarbeitbarkeitsbereich eines selbstverdichtenden Betons ermittelt werden. Der optimale Verarbeitbarkeitsbereich ist dadurch gekennzeichnet, dass der Beton unter den vorgesehenen Verarbeitungsbedingungen ausreichend fließt, entlüftet und sedimentationsstabil ist. Dabei bereitet die Beurteilung der Sedimentation die größten Probleme, da sie in der Regel erst erkannt wird, wenn das Bauteil bereits betoniert wurde. Bislang gibt es kein geeignetes Prüfverfahren, mit dem die Stabilität des Betons vorausgesagt oder als Schnelltest unmittelbar vor dem Einbau bestimmt werden kann. Die Fensterlösung bietet den Vorteil, dass die Sedimentationsneigung des Betons bereits im Vorfeld geprüft wird. Dazu werden zeitgleich zu den Frischbetonprüfungen Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit Probekörper hergestellt, um das Gefüge des Betons sowie die sich ausbildende Oberfläche im erhärteten Endzustand zu begutachten.

Für die Beurteilung der Verarbeitbarkeit des SVB wird in einem Diagramm die Trichterauslaufzeit als Maß für die Viskosität in Abhängigkeit vom Setzfließmaß als Kriterium für die Fließgrenze aufgetragen. Anhand der Ergebnisse aus den Gefügeuntersuchungen an den Festbetonprobekörpern kann über das Bruchbild und die Oberflächenstruktur des entsprechenden SVB ein Bereich in dem Diagramm eingegrenzt werden, in dem eine ausreichend fließfähige und entmischungsarme Verarbeitbarkeit vorliegt, blockierungsfreies Fließen vorausgesetzt. Das blockierungsfreie Fließen wird separat mit Box-Test, L-Box oder Blockierring gemäß den zu erwartenden Anforderungen ermittelt. Außerhalb

dieses Bereiches liegen Betonzusammensetzungen, die zur Sedimentation neigen bzw. nicht ausreichend entlüften (Lufteinschluss) oder nicht ausreichend fließen (Stagnation). Bild 7.5.1 zeigt schematisch den Verarbeitbarkeitsbereich für einen SVB.

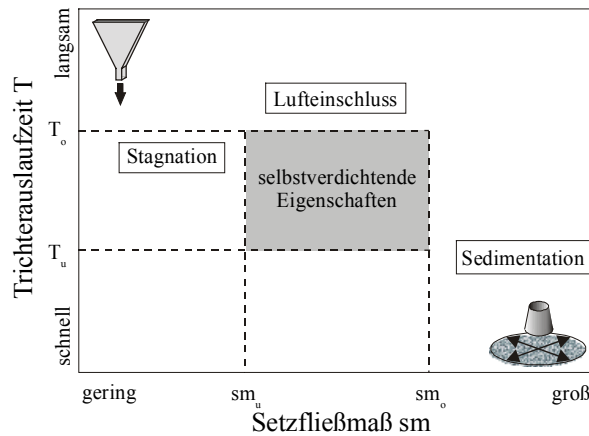


Bild 7.5.1: Rheologische Eigenschaften und Eigenschaftsbereiche eines SVB in Abhängigkeit von Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit

Durch die festgelegten unteren und oberen Grenzwerte für Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit werden der Zielwert und die zulässigen Abweichungen vom Zielwert gemäß Tafel 7.5.1 bestimmt.

Tafel 7.5.1: Zielwerte und zulässige Abweichungen für den Verarbeitbarkeitsbereich

Setzfließmaß sm	Zielwert	$sm = (sm_u + sm_o)/2$
	Abweichung	$\Delta sm = (sm_o - sm_u)/2$
Trichterauslaufzeit	Zielwert	$T = (T_u + T_o)/2$
	Abweichung	$\Delta T = (T_o - T_u)/2$

Die Grenzen des Fensters müssen kontinuierlich überprüft werden, da sie sich durch Schwankungen der Ausgangsstoffe verändern können. Befindet sich mindestens ein Wert, z. B. bei der Übergabe vor dem Einbau, nicht im Fenster, müssen geeignete Korrekturmaßnahmen (z. B. Fließmittelnachdosierung) eingeleitet werden, um den SVB wieder in den Verarbeitbarkeitsbereich zu bringen.

7.6 Steuerung der Verarbeitbarkeit

7.6.1 Allgemeines

Die Steuerung der Verarbeitbarkeitseigenschaften erfordert Kenntnisse über die Wechselwirkungen zwischen den verwendeten mehlfinen Stoffen, dem Wassergehalt und der Wirkungsweise des Fließmittels. Als Menge an Zugabewasser ist mindestens der Mindestwassergehalt vorzusehen, siehe Abschnitt 3.3.3. Dies ist der Wassergehalt, der erforderlich ist, um die Oberflächen der Feststoffpartikel zu benetzen und die Hohlräume des Mehlkornhaufwerks zu füllen. Er kennzeichnet den Übergang zwischen einem Kornhaufwerk und einer Suspension, an dem sich die scheinbare Kohäsion verliert und das Korngemisch bei Energieeinwirkung zu fließen beginnt. Ab diesem Wassergehalt sind die Suspensionseigenschaften durch Wasser und Fließmittel steuerbar.

7.6.2 Abweichung vom optimalen Wassergehalt

Der optimale Wassergehalt setzt sich aus dem Mindestwassergehalt und einem Vorhaltemaß zusammen, dass durch die Ettringitbildung gebunden wird. Abweichungen vom optimalen Wassergehalt können zum Verlust der Verarbeitbarkeit auf zwei verschiedene Arten führen, siehe Bild 7.6.1.

Durch Wassermangel ($w_{\text{opt}} - \Delta w$) verliert der SVB auch bei sehr hohen Fließmittelgehalten seine Verarbeitbarkeit in Richtung Stagnation bzw. Luftabschluss. Die Suspension Beton verwandelt sich wieder in ein teilbefeuchtetes Kornhaufwerk, in dem Kapillarkräfte aktiviert werden. Ein Wasserüberschuss ($w_{\text{opt}} + \Delta w$) hingegen fördert die Sedimentationsneigung des SVB. Je nach Wassergehalt kann es dazu führen, dass der Beton nie den Verarbeitbarkeitsbereich erreicht.

7.6.3 Variation des Fließmittelgehalts

Mit dem optimalen Wassergehalt und ab der Sättigungsdosierung für vollständige Dispergierung des Mehlkorns sind die zeitlichen Verarbeitbarkeitseigenschaften über eine zusätzliche Fließmitteldosierung steuerbar. Etwas erhöhte Setzfließmaße bzw. Trichterauslaufzeiten nach dem Mischen verringern sich systematisch infolge des charakteristischen Ansteifverhaltens des jeweiligen selbstverdichtenden Betons. Dieser Effekt kann gezielt genutzt werden, um die zeitlichen Verarbeitungseigenschaften einzustellen. Bild 7.6.2 zeigt schematisch

den Einfluss einer erhöhten Fließmitteldosierung auf den zeitlichen Verlauf der Verarbeitbarkeit.

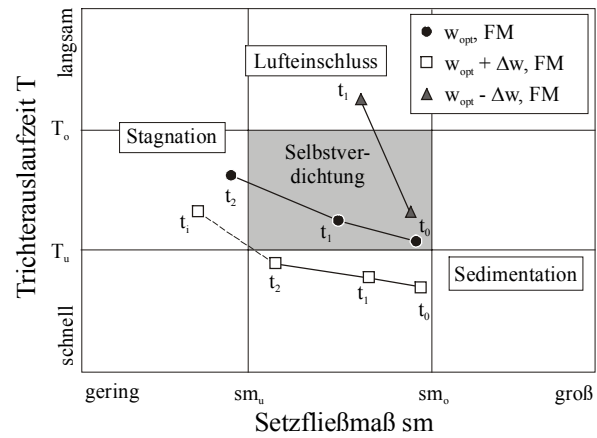


Bild 7.6.1: Einfluss des Wassergehalts auf die Verarbeitbarkeitseigenschaften

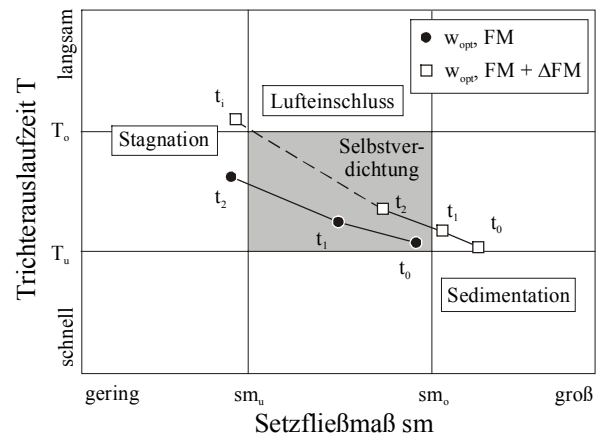


Bild 7.6.2: Einfluss des Fließmittels auf die Verarbeitbarkeitseigenschaften

7.6.4 Einstellung der Verarbeitbarkeit auf die Temperatur

Einige SVB zeigen ein unterschiedliches Frischbetonverhalten in verschiedenen Temperaturbereichen. Dies liegt an der temperaturabhängigen Löslichkeit des Sulfatträgers und Reaktivität des Calciumaluminates sowie an der unterschiedlichen Sorptionsgeschwindigkeit. Dem kann durch die temperaturgestufte Dosie-

rung des Fließmittels begegnet werden. So kann durch die Erhöhung der Fließmitteldosierung bei höheren Temperaturen sowie die Verringerung der Fließmitteldosierung bei niedrigeren Temperaturen der jeweilige Verarbeitbarkeitsbereich für selbstverdichtende Eigenschaften an den Verarbeitbarkeitsbereich von 20 °C angepasst werden, siehe Bild 7.6.3.

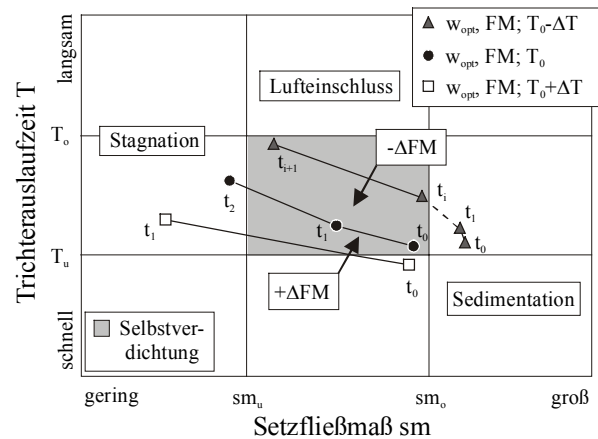


Bild 7.6.3: Einfluss der Temperatur auf die Verarbeitbarkeitseigenschaften

7.6.5 Korrekturmaßnahmen

Bei nicht mehr ausreichenden Setzfließmaßen und Trichterauslaufzeiten können durch eine Nachdosierung des Fließmittels ausreichende Verarbeitbarkeitseigenschaften selbst nach längeren Transport- bzw. Lagerzeiten wieder eingestellt werden. In Abhängigkeit der Lage des Betons im Verarbeitbarkeitsfenster bei Verlust der selbstverdichtenden Eigenschaften lässt sich eine Fließmittelnachdosierung gezielt einleiten. Das Ergebnis ist sofort durch die Lage im Verarbeitbarkeitsdiagramm bewertbar. Die Fließmittelnachdosierung führt in der Regel zu einer erneuten Dispergierung des Mehlkorns im Beton, so dass das Wasser, das zwischenzeitlich wieder in Agglomeraten eingeschlossen wurde, wieder freigesetzt wird. Da sich der Beton zum Zeitpunkt der Nachdosierung im Allgemeinen in der Ruheperiode befindet, ist von einem Wasserverlust infolge von Hydratation nicht auszugehen. Dies führt dazu, dass der Beton in fast allen Fällen seine anfängliche Trichterauslaufzeit erreicht. Die Zunahme des Setzfließmaßes hängt von der Höhe der Nachdosierung ab. Bild 7.6.4 zeigt schematisch die Auswirkungen einer Fließmittelnachdosierung auf die Verarbeitbarkeitseigenschaften eines selbstverdichtenden Betons.

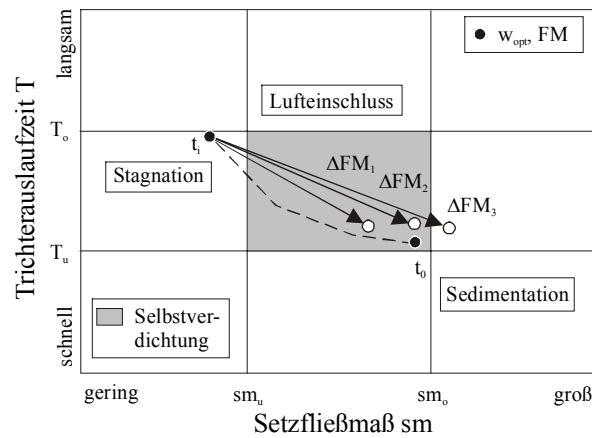


Bild 7.6.4: Nachdosierung von Fließmittel zu Wiederherstellung der Verarbeitbarkeitseigenschaften

7.7 Zusammenfassung

Der modifizierte Mischungsentwurf bietet die Möglichkeit, die für Selbstverdichtung benötigte Verarbeitbarkeit einschließlich Selbstentlüftung und Sedimentationsstabilität eines SVB einzustellen und zu beurteilen. Damit können die Herstellung gesteuert, die Übergaben auf der Baustelle geregelt und eventuell notwendige Korrekturmaßnahmen bei Verlust der entsprechenden Verarbeitbarkeit zielgerecht eingeleitet werden. Es werden die Mechanismen angegeben, mit denen die rheologischen Eigenschaften selbstverdichtender Betone gezielt beeinflusst werden können.

Darüber hinaus hat das aus dem modifizierten Mischungsentwurf entnommene Konzept zur individuellen Beurteilung der Verarbeitbarkeit von SVB als „Fensterlösung“ Eingang in die DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton gefunden [Ril03]. Es regelt die Anforderungen an den Frischbeton, die Lieferung von Frischbeton sowie die Produktionskontrolle.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Selbstverdichtender Beton ist ein Hochleistungsbeton, dessen besonderes Leistungsvermögen in der Frischbetoneigenschaft „Selbstverdichtung“ besteht. Er weist ein großes Potenzial für die Rationalisierung nicht nur in der Betonfertigteilproduktion, sondern auch des Bauablaufs auf der Baustelle auf. Um diese Vorteile zu nutzen, ist größte Sorgfalt bei der Herstellung und in der Qualitätssicherung zwingend erforderlich. Es muss ein Optimum zwischen Fließfähigkeit, Selbstentlüftung und Homogenität bzw. Stabilität gefunden werden. Der Begriff Selbstverdichtung beschreibt eine Frischbetoneigenschaft, die auf vielfältige Weise mit unterschiedlichen Betonausgangsstoffen und Zusammensetzungen erreicht werden kann. Die Art der Verwendung bestimmt die benötigte Verarbeitbarkeit und den Verarbeitbarkeitszeitraum. Daher fällt es schwer, allgemeingültige Anforderungen an die Frischbetoneigenschaften von SVB zu formulieren oder sie in bestimmte Kategorien oder Verarbeitbarkeitsklassen einzuordnen, wie es bei den üblichen Betonen nach Norm der Fall ist.

Die systematischen Untersuchungen zu den Themenbereichen Mehlkornoptimierung sowie Verflüssigung und ihr Einfluss auf die Verarbeitbarkeitseigenschaften selbstverdichtender Betone können folgendermaßen zusammengefasst werden.

- ☐ Der Startwassergehalt, von dem an die Fließeigenschaften über Wasser- und Fließmittelzugabe steuerbar werden, kann über die Verteilungsbreite des Mehlkornhaufwerks und dessen Zusammensetzung (reaktiv, inert, rund, gebrochen) über den hier vorgestellten β_p^* -Wert hinreichend genau für die weitere Optimierung abgeschätzt werden.
- ☐ Alle Fließmittel konnten die unterschiedlichen Mehlkornhaufwerke nahezu vollständig dispergieren. Ab der Sättigungsdosierung für vollständige Verflüssigung können die zeit- und temperaturabhängigen Verarbeitbarkeitseigenschaften durch zusätzliche Fließmittelzugabe eingestellt werden. Zwischen den einzelnen Fließmitteln zeigten sich deutliche Unterschiede in der Verflüssigungsdauer. Dies ist je nach Anwendungsfall und benötigter Verarbeitbarkeitszeit in Vorversuchen zu prüfen.
- ☐ Um die selbstverdichtenden Eigenschaften eines SVB zu beurteilen, wurde ein Lösungsansatz entwickelt, die Verarbeitbarkeit in einem Diagramm mit den zwei Kenngrößen Setzfließmaß - als Maß für die Fließgrenze - und Trichterauslaufzeit - als Maß für die Viskosität - darzustellen.

Der optimale Verarbeitbarkeitsbereich für Selbstverdichtung sowie die Grenzen der Verarbeitbarkeit (Stagnation und Sedimentation) sind für den entsprechenden SVB in Frisch- und Festbetonuntersuchungen durch Variation der Wasser- und Fließmittelgehalte zu prüfen und festzulegen. Zur Beurteilung der Mischungsstabilität und der Selbstentlüftung werden die Oberflächen und Bruchbilder von Probekörpern, die mit dem SVB hergestellt wurden, mit den zugehörigen Frischbetonkennwerten verglichen. Somit lässt sich der Bereich der selbstverdichtenden Eigenschaft durch einen Verarbeitbarkeitsbereich innerhalb des Verarbeitbarkeitsdiagramms kennzeichnen. Die Lage und Größe des Bereiches ist vom verwendeten Mehlkorn und Fließmittel abhängig.

Liegen beide Frischbetonkennwerte Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit innerhalb des Verarbeitbarkeitsfensters, kann davon ausgegangen werden, dass der Beton ausreichend fließt, entlüftet und mischungsstabil ist. Dadurch wird besonders die Sedimentationsneigung im Vorfeld prüfbar. Ferner werden Abweichungen von der Sollzusammensetzung innerhalb des Verarbeitbarkeitsdiagramms erkennbar. Dem entsprechend können auch bei nicht ausreichenden Frischbetonkennwerten von Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit geeignete Korrekturmaßnahmen (z. B. Fließmittelnachdosierung) zielgerichtet eingeleitet werden, um den SVB wieder in den vorher festgelegten Verarbeitbarkeitsbereich zu bringen.

- Das in dieser Arbeit im Rahmen des modifizierten Mischungsentwurfs herausgearbeitete Konzept zur Beurteilung der Frischbetoneigenschaften selbstverdichtender Betone hat als „Fensterlösung“ Eingang in die DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton gefunden. Es regelt die Anforderungen an den Frischbeton, die Lieferung von Frischbeton sowie die Produktionskontrolle und ist in der Richtlinie im Anhang Q aufgeführt.
- Die Bestimmung der Verarbeitbarkeitseigenschaften selbstverdichtender Betone über die Fensterlösung erfordert die Ermittlung der Kenngrößen Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit. Dabei bereitet die Bestimmung der Trichterauslaufzeit unter Baustellenbedingungen häufig Probleme. Neue Prüfverfahren wie der Auslaufkegel eignen sich, um den Prüfaufwand bei der Herstellung und Verwendung selbstverdichtender Betone deutlich zu reduzieren und die Vorteile der Fensterlösung effektiv zu nutzen [Kor04].

Das Bild 8.1.1 fasst die Steuerung der Verarbeitbarkeit für selbstverdichtende Betone zusammen.

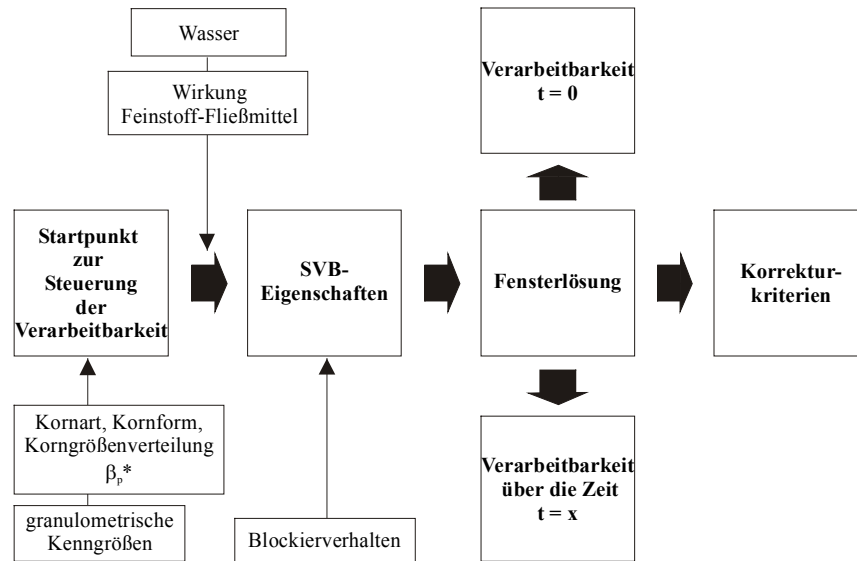


Bild 8.1.1: Steuerung der Verarbeitbarkeitseigenschaften selbstverdichtender Betone

9 Formelzeichen

Lateinische Buchstaben

a	Ausbreitmaß
D	Siebdurchgang
d ₅₀	Medianwert der Normalverteilung
FM	Massebezogener Fließmittelgehalt
FS	Massebezogener Feststoffgehalt
g	Rheometrische Fließgrenze
h	Rheometrische Viskosität
N	Belastungsgeschwindigkeit
n	Steigungsmaß der RRSB-Verteilung
Q ₃ (x)	Massenverteilungssumme
R	Relative Trichtergeschwindigkeit
r ²	Korrelationskoeffizient
s	Standardabweichung
sm	Setzfließmaß
T	Scherwiderstand, Temperatur, Trichterauslaufzeit
t	Zeit
t ₅₀₀	Fließzeit
V	Volumen, Potenzial
w	Wassergehalt
WA	Wasseranspruch zur Erzielung der Normsteife
WS	Massebezogener Wirkstoffgehalt
x	Korndurchmesser
x'	Lageparameter der RRSB-Verteilung
z	Zementgehalt

Griechische Buchstaben

β_p	Wasser/Feststoff-Volumenverhältnis für Sättigung nach Okamura
$\beta_{p,n}$	Berechnetes Wasser/Feststoff-Volumenverhältnis für Sättigung
β_p^*	Korrigiertes Wasser/Feststoff-Volumenverhältnis für Sättigung
ε	Porenraum
Γ	Relative Ausbreitfläche
$\dot{\gamma}$	Schergeschwindigkeit
η	Plastische Viskosität
η'	Dynamische oder scheinbare Viskosität
τ	Scherspannung
τ_f	Fließgrenze

Indizes

0	Nullwert
A	Anziehungsenergie
b	Beton
cal	Berechnet
cum	Kumulativer Hohlraum
Hg	Prüfwert Quecksilberdruckporosimetrie
m	Mörtel
o	Oberer Grenzwert
opt	Optimaler Gehalt
P	Powder - Mehlkorn
R	Abstoßungsenergie
start	Startgehalt für Optimierung
u	Unterer Grenzwert
V	Verflüssigungsdauer
W	Wasser

10 Literatur

- [Ait94] Aïtcin, P. C.; Jolicoeur, C.; MacGregor, J. C.: *Superplasticizers: How they work and why they occasionally don't*. In: Concrete International 16 (1994), Nr. 5, S. 45-52
- [Alb01] Albrecht, G.: *Polymere Fließmittel*. Vortrag im Rahmen eines Kolloquiums von SKW Polymers GmbH und Forschungsinstitut der Zementindustrie (Verein Deutscher Zementwerke (Veranstalter)), 3. Juli 2001, Düsseldorf, Deutschland
- [And88] Andersen, P. J.; Roy, D. M.; Gaidis, J. M.: *The effect of superplasticizer molecular weight on its adsorption and dispersion of cement*. In: Cement and Concrete Research 18 (1988), Nr. 6, S. 980-986
- [Atz85] Atzeni, C.; Massidda, L.; Sanna, U.: *Comparison between rheological models for portland cement pastes*. In: Cement and Concrete Research 15 (1985), Nr. 3, S. 511-519
- [Ban91] Banfill, P. F. G.: *A coaxial cylinder viscosimeter for mortar: design and experimental validation*. In: Rheology of Cement and Concrete (Banfill, P. F. G. (Ed.)), E & FN Spon, London, 1991, S. 217-226
- [Ban92] Banfill, P. F. G.; Hornung, F.: *Zweipunktmessung im ViscoCorder*. In: beton 42 (1992), Nr. 2, S. 84-88
- [Ban01] Banfill, P. F. G. et al: *Comparison of concrete rheometers: International tests at LCPC (Nantes, France) in October 2000*. NISTIR 6819 (Ferraris, C. F.; Brower, L. E. (Ed.)), September, 2001
- [Ban03] Banfill, P. F. G.: *The rheology of fresh cement and concrete - A review*. In: 11th International Congress on the Chemistry of Cement: Cement's contribution to development in the 21st century, Halfway House: Cement and Concrete Institute 2003 (Grieve, G.; Owens, G. (Ed.)), 11.-16. Mai 2003, Durban, Südafrika, S. 50-63
- [Bar99] Bartos, P. J. M.; Grauers, M.: *Self-compacting concrete*. In: Concrete 33 (1999), Nr. 4, S. 9-13

- [Bea99] Beaupré, D.; Lacombe, P.; Khayat, K. H.: *Laboratory investigation of rheological properties and scaling resistance of air entrained self-consolidating concrete*. In: Materials and Structures/Matériaux et Construction 32 (1999), Nr. 4, S. 235-240
- [Bon84] Bonzel, J.; Krell, J.: *Konsistenzprüfung von Frischbeton*. In: beton 34 (1984), Nr. 2, S. 61-66 und Nr. 3, S. 101-104
- [Boo03] Boos, P.: *Herstellung dauerhafter zementgebundener Oberflächen im Trinkwasserbereich – Korrosionsanalyse und technische Grundanforderungen*. Schriftenreihe der Zementindustrie (Verein Deutscher Zementwerke (Hrsg.)), Heft 64/2003, Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf 2003
- [Bra01] Brameshuber, W.; Krüger, T.; Uebachs, S.: *Selbstverdichtender Beton im Transportbetonwerk*. In: beton 51 (2001), Nr. 10, S. 546-550
- [Bra02] Brameshuber, W.; Uebachs, S.: *Selbstverdichtender Beton – Anwendung in Deutschland*. In: Beton- und Stahlbetonbau 97 (2002), Nr. 6, S. 316-321
- [Bra03] Brameshuber, W.; Uebachs, S.: *The influence of the temperature on the rheological properties of self-compacting concrete*. In: Rilem Proceedings PRO 33, 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete (Wallevik, O.; Nielsson, I. (Ed.)), 17.-20. August 2003, Reykjavik, Island, S. 174-183
- [Bri98] Bringolf, D.; Lunk, P.: *Glenium – Hochleistungsverflüssiger der neuen Generation*. In: Moderne Betontechnologie und innovativer Betonbau – ein Beitrag zu dauerhaftem Beton, Schriftenreihe der MBT (Schweiz) AG, Meynadier, Heft 1, Dezember 1998, S. 1-13
- [Bud99] Budnik, J.; Starkmann, U.: *Der Naturzugkühlturm Niederaußem - Praxisgerechte Betontechnologie für zielsichere Anwendung*. In: beton 49 (1999), Nr. 10, S. 548-553
- [Bui02] Bui, V. K.; Akkaya, Y.; Shah, S. P.: *Rheological model for self-consolidating concrete*. In: ACI Materials Journal 99 (2002), Nr. 6, S. 549-559

- [Chi85] Chiochio, G.; Paolini, A. E.: *Optimum time for adding superplasticizers to portland cement pastes*. In: Cement and Concrete Research 15 (1985), Nr. 5, S. 901-908
- [Cle98] Clergue, C.: *Un exemple d'application de béton auto-plaçant*. In: Journée Technique de l'Industrie Cimentière, 21. Januar 1998, S. 1-9
- [Dia78] Diamon, M.; Roy, D. M.: *Rheological properties of cement mixes: I. Methods, preliminary experiments, and adsorption studies*. In: Cement and Concrete Research 8 (1978), Nr. 6, S. 753-764
- [Dom99] Domone, P. L. J.; Yongmo, X.; Banfill, P. F. G.: *Developments of the two-point workability test for high-performance concrete*. In: Magazine of Concrete Research 51 (1999), Nr. 3, S. 171-179
- [Fan99] Fang, W.; Jianxiong, C.; Changhui, Y.: *Studies on self-compacting high performance concrete with high volume mineral additives*. In: Rilem Proceedings PRO 7, First International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete (Skarendahl, A.; Petersson, Ö. (Ed.)), 13.-14. September 1999, Stockholm, Schweden, S. 569-590
- [Fla73] Flatten, H.: *Untersuchungen über das Fließverhalten von Zementleim*. Dissertation an der Technischen Hochschule Aachen, 1973
- [Fla74] Flatten, H.; vom Berg, W.: *Überlegungen zum Verformungsverhalten von Feinmörtel und Frischbeton*. In: Betonwerk+Fertigteil-Technik 40 (1974), Nr. 7, S. 469-475
- [Ger98] Germann, A.; Lunk, P.: *Self Compacting Concrete – Praktische Erfahrungen und Perspektiven*. In: Moderne Betontechnologie und innovativer Betonbau – ein Beitrag zu dauerhaftem Beton, Schriftenreihe der MBT (Schweiz) AG, Meynadier, Heft 1, Dezember 1998, S. 33-44
- [Gra02] Graubner, C. A.; Lieberum, K. H.; Proske, T.: *Eigenschaften von selbstverdichtendem Beton*. In: Beton- und Stahlbetonbau 97 (2002), Heft 12, S. 650-656

- [Gre04] Greim, M.: *Alles fließt – Baustoff-Rheometrische Messverfahren und ihre Grenzen*. In: Internetveröffentlichung der Beiträge zum 13. Kolloquium und Workshop über Rheologische Messungen an mineralischen Baustoffen (Schleibinger Geräte, Greim, M. (Ed.)), 10.-11. März 2004, Regensburg, Deutschland, <http://www.schleibinger.com>, Download vom 20.03.2004
- [Gru84] Grube, H.; Krell, J.: *Prüftechnische Einflüsse auf die Bestimmung des Ausbreitmaßes von Beton*. In: beton 34 (1984), Nr. 10, S. 409-414
- [Gru99] Grube, H.; Rickert, J.: *Selbstverdichtender Beton – ein weiterer Entwicklungsschritt des 5-Stoff-Systems Beton*. In: beton 49 (1999), Nr. 4, S. 239-243
- [Gut90] Gutteridge, W. A.; Dalziel, J. A.: *The Effect of the secondary component on the hydration of portland cement*. In: Cement and Concrete Research 20 (1990), Nr. 5, S. 778-782 und Nr. 6, S. 853-861
- [Ham00] Hamada, D.; Sato, T.; Yamato, F.; Mizunuma, T.: *Development of new superplasticizer and its application to self-compacting concrete*. In: Proceedings of Sixth CANMET-ACI International Conference on Superplasticizers and other Chemical Admixtures in Concrete (Malhotra, V. M. (Ed.)), 10.-13. Oktober 2000, Nizza, Frankreich, S. 269-290
- [Han99] Hanehara, S.; Yamada K.: *Interaction between cement and chemical admixture from the points of cement hydration, admixture adsorption and paste rheology*. In: Cement and Concrete Research 29 (1999), Nr. 8, S. 1159-1165
- [Hau01] Hauck, H. G.: *Stabilisierer*. In: Skript des Seminars Betonzusatzmittel-Betonzusatzstoffe vom 13.12.2001, Technische Akademie Esslingen, Ostfildern, 2001
- [Hib02] Hibino, M.; Maruyama, K.: *Effect of surface moisture of sand on fluidity of fresh mortar*. In: Proceedings of the first fib Congress 2002, Concrete Structures in the 21st Century, CD C: Session 9 (Fédération Internationale du Béton, fib (Hrsg.)), 13.-18. Oktober 2002, Osaka, Japan, S. 105-110

- [Hu95] Hu, C.; Larrard, F. de; Gjrv, O. E.: *Rheological testing and modelling of fresh high performance concrete*. In: Materials and Structures 28 (1995), Nr. 175, S. 1-7
- [Hu96] Hu, C. et al: *Validation of BTRHEOM, the new rheometer for soft-to-fluid concrete*. In: Materials and Structures 29 (1996), Nr. 12, S. 620-631
- [Jac99] Jacobs, F.; Hunkeler, F.; Schlumpf, J.: *Self Compacting Concrete, Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton*. In: Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr. 12, 26.03.1999, S. 4-8
- [Jia99] Jiang, S.; Kim, B. G.; Atcin, P. C.: *Importance of adequate soluble alkali content to ensure cement/superplasticizer compatibility*. In: Cement and Concrete Research 29 (1999), Nr. 1, S. 71-78
- [Kai69] Kaiser, W.: *Die technologischen Eigenschaften von Zementsuspensionen und die daraus ableitbaren Folgerungen für die Praxis im Tiefbau*. Schriftenreihe des Otto-Graf-Instituts Stuttgart, Heft 42, 1969
- [Kai74] Kaiser, W: *Untersuchungen an Zementsuspensionen*. In: Zement-Kalk-Gips International 27 (1974), Nr. 11, S. 565-569
- [Kec99] Keck, H. J.: *Untersuchung des Fließverhaltens von Zementleim anhand rheologischer Messungen*. Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaften, Band 5, Shaker Verlag, Aachen, 1999
- [Kle99] Kleen, E.: *Zusatzmittel für Hochleistungsbetone*. In: Tagungsunterlagen vom 3. Bauchemie Forum „Planung, Praxis, Recht“ (Deutsche Bauchemie e.V. (Veranstalter)), 20. Januar 1999, München, Deutschland
- [Kor02] Kordts, S.; Grube, H.: *Steuerung der Verarbeitbarkeitseigenschaften von selbstverdichtendem Beton als Transportbeton*. In: beton 52 (2002), Nr. 4, S. 217-223

- [Kor03] Kordts, S.; Breit, W.: *Controlling the workability properties of self-compacting concrete used as ready-mixed concrete*. In: Rilem Proceedings PRO 33, 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete (Wallevik, O.; Nielsson, I. (Ed.)), 17.-20. August 2003, Reykjavik, Island, S. 220-231
- [Kor04] Kordts, S.; Breit, W.: *Kombiniertes Prüfverfahren zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit von SVB – Auslaufkegel*. In: beton 54 (2004), Nr. 4, S. 213-219
- [Kre85a] Krell, J.: *Einfluss chemisch-mineralogischer Reaktionen des Zements auf das Ansteifen von Zementleim und Beton*. In: beton 35 (1985), Nr. 12, S. 465-472
- [Kre85b] Krell, J.: *Die Konsistenz von Zementleim, Mörtel und Beton und ihre zeitliche Veränderung*. Schriftenreihe der Zementindustrie (Verein Deutscher Zementwerke (Hrsg.)), Heft 46, Beton-Verlag, Düsseldorf, 1985
- [Kre87] Krell, J.: *Einfluss der Feinststoffe im Beton auf die Frischbetonkonsistenz*. In: Berichte vom Fachkolloquium „Zementleim, Frischmörtel, Frischbeton“ (Wierig, H. J. (Ed.)), Mitteilungen aus dem Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der Universität Hannover, Heft 55, 1987, S. 160-176
- [Kre88] Krell, J.; Wischers, G.: *Einfluss der Feinststoffe im Beton auf Konsistenz, Festigkeit und Dauerhaftigkeit*. In: beton 38 (1988), Nr. 9, S. 356-359 und Nr. 10, S. 401-404
- [Lar97] Larrard, F. de et al: *A new rheometer for soft-to-fluid fresh concrete*. In: ACI Materials Journal 94 (1997), Nr. 3, S. 234-243
- [Lar99] Larrard, F. de: *Concrete Mixture Proportioning – A scientific approach*. Modern Concrete Technology 9, E & FN Spon, London, 1999
- [Loc76] Locher, F. W.; Richartz, W.; Sprung, S.: *Erstarren von Zement, Teil 1: Reaktion und Gefügeentwicklung*. In: Zement-Kalk-Gips International 29 (1976), Nr. 10, S. 435-442

- [Loc80] Locher, F. W.; Richartz, W.; Sprung, S.: *Erstarren von Zement, Teil 2: Einfluss des Calciumsulfatzusatzes*. In: Zement-Kalk-Gips International 33 (1980), Nr. 6, S. 271-277
- [Loc82] Locher, F. W.; Richartz, W.; Sprung, S.; Sylla, H. M.: *Erstarren von Zement, Teil 3: Einfluss der Klinkerherstellung*. In: Zement-Kalk-Gips International 35 (1982), Nr. 12, S. 669-676
- [Loc83] Locher, F. W.; Richartz, W.; Sprung, S.; Rechenberg, W.: *Erstarren von Zement, Teil 4: Einfluss der Lösungszusammensetzung*. In: Zement-Kalk-Gips International 36 (1983), Nr. 4, S. 224-231
- [Mae98] Maeyama, A.; Maruyama, K.; Midorikawa, T.; Sakata, N.: *Characterization of powder for self-compacting concrete*. In: Proceedings of International Workshop on Self-compacting Concrete (Ozawa, K.; Ouchi, M. (Ed.)), Kochi University of Technology, 23.-26. August 1998, Tosa-yamada Kochi, Japan, S. 191-200
- [Näg87] Nägele, E.; Schneider, U.: *Das Zeta-Potential von Zement*. In: Berichte vom Fachkolloquium „Zementleim, Frischmörtel, Frischbeton“ (Wierig, H. J. (Ed.)), Mitteilungen aus dem Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der Universität Hannover, Heft 55, 1987, S. 68-87
- [Naw98] Nawa, T.; Izumi, T.; Edamatsu, Y.: *State-of-the-art report on materials and design of self-compacting concrete*. In: Proceedings of International Workshop on Self-compacting Concrete (Ozawa, K.; Ouchi, M. (Ed.)), Kochi University of Technology, 23.-26. August 1998, Tosa-yamada Kochi, Japan, S. 160-190
- [Naw00] Nawa, T.; Ichiboji, H.; Kinoshita, M.: *Influence of temperature on fluidity of cement paste containing superplasticizer with polyethylene oxid graft chains*. In: Proceedings of Sixth CANMET-ACI International Conference on Superplasticizers and other Chemical Admixtures in Concrete (Malhotra, V. M. (Ed.)), 10.-13. Oktober 2000, Nizza, Frankreich, S. 195-210
- [Neh98] Nehdi, M.; Mindess, S.; Aïtcin, P. C.: *Rheology of high-performance concrete: Effect of ultrafine particles*. In: Cement and Concrete Research 28 (1998), Nr. 5, S. 687-697

- [Oh99] Oh, S. G.; Noguchi T.; Tomosawa, F.: *Toward mix design for rheology of self-compacting concrete*. In: Rilem Proceedings PRO 7, First International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete (Skarendahl, A.; Petersson, Ö. (Ed.)), 13.-14. September 1999, Stockholm, Schweden, S. 361-372
- [Oht97] Ohta, A.; Sugiyama, T.; Tanaka Y.: *Fluidizing mechanism and application of polycarboxylate-based superplasticizers*. In: Proceedings of Fifth CANMET-ACI International Conference on Superplasticizers and other Chemical Admixtures in Concrete (Malhotra, V. M. (Ed.)), 7.-10. Oktober 1997, Rom, Italien, S. 359-378
- [Oka95] Okamura, H.; Ozawa, K.: *Mix design for self-compacting concrete*. In: Concrete Library of JSCE No. 25, June 1995 (Translation from Proc. of JSCE, No. 496/V-24, 1994.8), S. 107-120
- [Opp99] Oppikofer, R.; Schlumpf, J.: *Selbstverdichtender Beton im Praxiseinsatz*. In: Schweizer Baublatt 110 (1999), Nr. 49, S. 22-24
- [Pap63] Papadakis, M.: *Die Bedeutung der Feinstoffe in der Fließkunde des Frischbetons*. In: Betonstein-Zeitung 29 (1963), Nr. 11, S. 544-558
- [Pet96] Petersson, Ö.; Billberg, P.; Bui, V. K.: *A Model for self compacting concrete*. In: Rilem Proceedings PRO 32, Rilem International Conference on Production Methods and Workability of Concrete (Bartos, P. J. M.; Marrs, D. L.; Cleland, D. J. (Ed.)), 3.-5. Juni 1996, Glasgow, Schottland, S. 483-492
- [Pet98] Petersson, Ö.; Billberg, P.; Österberg, T.: *Applications of self compacting concrete for bridge castings*. In: Schriftenreihe der MBT AG, Dezember 1998, Heft 1, S. 45-53
- [Pet99] Petersson, Ö.; Billberg, P.: *Investigation on blocking on self-compacting concrete with different maximum aggregate size and use of viscosity agent instead of filler*. In: Rilem Proceedings PRO 7, First International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete (Skarendahl, A.; Petersson, Ö. (Ed.)), 13.-14. September 1999, Stockholm, Schweden, S. 333-344

- [Pla03] Plank, J.; Hirsch, C.: *Superplasticizer adsorption on synthetic ettringite*. In: Proceedings of Seventh CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and other Chemical Admixtures in Concrete (Malhotra, V. M. (Ed.)), 20.-23. Oktober 2003, Berlin, Deutschland, S. 283-297
- [Pun02] Puntke, W.: *Wasseranspruch von feinen Kornhaufwerken*. In: beton 52 (2002), Nr. 5, S. 242-248
- [Ram83] Ramachandran, V. S.: *Adsorption and hydration behaviour of tricalcium aluminate-water and tricalcium aluminate-gypsum-water systems in the presence of superplasticizers*. In: Journal of the American Concrete Institute 80 (1983), Nr. 3, S. 235-241
- [Ram87] Ramachandran, V. S.: *Use of superplasticizers in concrete*. In: il cemento 84 (1987), Nr. 3, S. 273-298
- [Ram98] Ramachandran, V. S.; Malhotra, V. M.; Jolicoeur, C.; Spiratos, N.: *Superplasticizers: Properties and application in concrete*. (Canada Centre for Mineral and Energy Technology, CANMET (Hrsg.)), Canada Centre for Mineral and Energy Technology, CANMET, Ontario, Kanada, 1998
- [Rei01] Reinhardt, H. W. et al: *Sachstandsbericht selbstverdichtender Beton (SVB)*. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb (Hrsg.)), Heft 516, Beuth, Berlin 2001
- [Ren85] Rendchen, K.: *Einfluss der Granulometrie von Zement auf die Eigenschaften des Frischbetons und auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten des Festbetons*. Schriftenreihe der Zementindustrie (Verein Deutscher Zementwerke (Hrsg.)), Heft 45, Beton-Verlag Düsseldorf, 1985
- [Ren87] Rennert, P.; Schmiedel, H.; Weißmantel, C.: *Kleine Enzyklopädie Physik*. VEB Bibliographisches Institut Leipzig, 1986, Lizenzausgabe für den Verlag Harri Deutsch, Thun, Frankfurt/M 1987, S. 154

- [Res00] Reschke, T.: *Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton*. Schriftenreihe der Zementindustrie (Verein Deutscher Zementwerke (Hrsg.)), Heft 62, Verlag Bau und Technik, Düsseldorf, 2000
- [Ric69] Richartz, W.: *Über die Gefüge- und Festigkeitsentwicklung des Zementsteins*. In: beton 19 (1969), Nr. 5, S. 203-206 und Nr. 6, S. 245-248
- [Ric83] Richartz, W.: *Einfluss von Zusätzen auf das Erstarrungsverhalten von Zement*. In: beton 33 (1983), Nr. 11, S. 425-429 und Nr. 12, S. 465-471
- [Ric04] Rickert, J.: *Zum Einfluss von Langzeitverzögerern auf der Basis von Phosphonsäure auf die Hydratation einzelner Klinkerphasen, Portlandzementklinker und Portlandzemente*. Schriftenreihe der Zementindustrie (Verein Deutscher Zementwerke (Hrsg.)), Heft 65, Verlag Bau und Technik, Düsseldorf, 2004
- [Ril01] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – DAfStb: *DAfStb-Richtlinie für selbstverdichtenden Beton (SVB-Richtlinie): Ergänzungen zu DIN 1045/09.88*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb (Hrsg.), Beuth, Berlin 2001
- [Ril03] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – DAfStb: *DAfStb-Richtlinie für selbstverdichtenden Beton (SVB-Richtlinie): Ergänzungen zu DIN EN 206-1/DIN 1045-2/07.01*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb (Hrsg.), Beuth, Berlin, November 2003
- [Rol99] Rols, S.; Ambroise, J.; Péra, J.: *Effects of different viscosity agents on the properties of self-leveling concrete*. In: Cement and Concrete Research 29 (1999), Nr. 2, S. 261-266
- [Rum74] Rumpf, H.: *Die Wissenschaft des Agglomerierens*. In: Chemie-Ingenieur-Technik 46 (1974), Nr. 1, S. 1-11
- [Sak03] Sakai, E.; Yamada, K.; Ohta, A.: *Molecular structure and dispersion-adsorption mechanisms of comb-type superplasticizers used in Japan*. In: Journal of Advanced Concrete Technology 1 (2003), Nr. 1, S. 16-25

- [Sar92] Sarkar, S. L.; Xu, A.: *Preliminary study of very early hydration of superplasticized C_3A and gypsum by environmental SEM*. In: Cement and Concrete Research 22 (1992), Nr. 4, S. 605-608
- [Sch99] Schnatz, R.; Ellerbrock, H. G.; Sprung, S.: *Beschreibung und Reproduzierbarkeit gemessener Korngrößenverteilungen feingemahlener Stoffe*. In: Zement-Kalk-Gips International 52 (1999), Nr. 2, S. 57-67 und Nr. 3, S. 128-133
- [Sch73] Schubert, H.: *Kapillardruck und Zugfestigkeit von feuchten Haufwerken aus körnigen Stoffen*. In: Chemie-Ingenieur-Technik 45 (1973), Nr. 6, S. 396-401
- [Sch59] Schwanda, F.: *Der Hohlraumgehalt von Korngemischen*. In: beton 9 (1959), Nr. 1, S. 12-19
- [Sed99] Sedran, T.; Larrard, F. de: *Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model*. In: Rilem Proceedings PRO 7, First International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete (Skarendahl, A.; Petersson, Ö. (Ed.)), 13.-14. September 1999, Stockholm, Schweden, S. 321-332
- [Shi03] Shindoh, T.; Matsuoka, Y.: *Development of combination-type self-compacting concrete and evaluation test methods*. In: Journal of Advanced Concrete Technology 1 (2003), Nr. 1, April, S. 26-36
- [Sie02] Siebel, E.; Kordts, S.: *Selbstverdichtender Beton als Transportbeton*. Technischer Bericht BTe-TB-B1668, Verein Deutscher Zementwerke, Düsseldorf, Oktober 2002
- [Son70] Sonntag, H.; Strenge, K.: *Koagulation und Stabilität disperser Systeme*. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1970
- [Spa95] Spanka, G.; Grube, H.; Thielen, G.: *Wirkungsmechanismen verflüssigender Betonzusatzmittel*. In: beton 45 (1995), Nr. 11, S. 802-808 und Nr. 12, S. 876-881

- [Spa97] Spanka, G.; Grube, H.: *Rheologische Eigenschaften von Zementleimen und deren Auswirkungen auf die Verarbeitungseigenschaften von Frischbeton*. In: Beiträge zur 13. Internationalen Baustofftagung ibausil (Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.)), Band 1, 24.-26. September 1997, Weimar, Deutschland, S. 301-312
- [Spr91] Sprung, S.; Siebel, E.: *Beurteilung der Eignung von Kalkstein zur Herstellung von Portlandkalksteinzement (PKZ)*. In: Zement-Kalk-Gips International 44 (1991), Nr. 1, S. 1-11
- [Ste98] Steigenberger, J.: *Selbstverdichtender Beton (SCC) - Anwendung im Fertigteilwerk*. In: Zement und Beton 44 (1998), Nr. 4, S. 8-9
- [Str02] Struble, L.: *Colloidal suspensions*. In: Proceedings of Ph.D. course at DTU (Shah, S.; Bui, V. K., Geiker, M. (Ed.)), 19.-24. August 2002, Kopenhagen, Dänemark, Lecture 8
- [Sug03] Sugiyama, T.; Otha, A.; Uomoto, T.: *The dispersing mechanism and applications of polycarboxylate-based superplasticizers*. In: 11th International Congress on the Chemistry of Cement: Cement's contribution to development in the 21st century, Halfway House: Cement and Concrete Institute 2003 (Grieve, G.; Owens, G. (Ed.)), 11.-16. Mai 2003, Durban, Südafrika, S. 560-568
- [Syb93] Sybertz, F.: *Beurteilung der Wirksamkeit von Steinkohlenflugaschen als Betonzusatzstoff*. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb (Hrsg.)), Heft 434, 1993
- [Tak98a] Takada, K.; Pelova, G. I.; Walraven, J. C.: *Influence of mixing efficiency on the mixture proportion of general purpose self-compacting concrete*. In: International Symposium on High-Performance and Reactive Powder Concretes (Aïtcin, P. C.; Delagrave, Y. (Ed.)), 16.-20. August 1998, Sherbrooke, Kanada, S. 19-39
- [Tak98b] Takada, K.; Pelova, G. I.; Walraven J. C.: *Self-Compacting Concrete Produced by Japanese Method with Dutch Materials*. In: Proceedings of the 12th European ready mixed concrete congress ERMCO 98 (Portuguese Ready Mixed Concrete Association, APEB (Hrsg.)), 23.-26. Juni 1998, Lissabon, Portugal, S. 775-785

- [Tan95] Tangtermsirikul, S.; Bui, V. K.: *Blocking criteria for aggregate phase of self-compacting high performance concrete*. In: Proceedings of Regional Symposium on Infrastructures Development in Civil Engineering, 19.-20. Dezember 1995, Bangkok, Thailand, S. 58-69
- [Tat73] Tattersall, G. H.: *The rationale of a two-point workability test*. In: Magazine of Concrete Research 25 (1973), Nr. 84, S. 169-174
- [Tat83a] Tattersall, G. H.: *Der Zweipunktversuch zur Messung der Verarbeitbarkeit*. In: Betonwerk+Fertigteil-Technik 49 (1983), Nr. 12, S. 789-792
- [Tat83b] Tattersall, G. H.; Banfill, P. F. G.: *The rheology of fresh concrete*. Pitman Books, Limited, London, 1983
- [Tat91] Tattersall, G. H.: *Workability and quality control of concrete*. E & FN Spon, London, 1991
- [Teu82] Teubert, J.; Kilian, G.: *Konsistenzmessungen am Zementmörtel mittels eines Rotationsviskosimeters*. In: beton 32 (1982), Nr. 3, S. 103-107
- [Thi97] Thielen, G.; Spanka, G.; Grube, H.: *Regelung der Konsistenz von Beton durch Fließmittel*. In: beton 47 (1997), Nr. 8, S. 470-475
- [Thi02] Thielen, G.; Kordts, S.: *Verarbeitungseigenschaften von Hochleistungsbetonen*. In: Jahrbuch 2002 Bautechnik (VDI-Gesellschaft Bautechnik (Hrsg.)), Düsseldorf, VDI-Verlag, 2002, S. 157-166
- [Uch92] Uchikawa, H.; Hanehara, S.; Shirasaka, T.; Sawaki, D.: *Effect of admixture on hydration of cement, adsorptive behaviour of admixture and fluidity and setting of fresh cement paste*. In: Cement and Concrete Research 22 (1992), Nr. 6, S. 1115-1129
- [Wal90] Wallevik, O. H.; Gjörv, O. E.: *Development of a coaxial cylinder Viscometer for fresh concrete*. In: RILEM Proceedings 10, Properties of fresh concrete (Wierig, H. J. (Ed.)), Chapman & Hall London, 3.-5. Oktober 1990, Hannover, Deutschland, S. 213-224

- [Wal02] Wallevik, O. H.: *Practical description of the rheology of fresh concrete*. In: Proceedings of Ph.D. course at DTU (Shah, S.; Bui, V. K., Geiker, M. (Ed.)), 19.-24. August 2002, Kopenhagen, Dänemark
- [Wal03] Wallevik, O. H.: *Rheology – A scientific approach to develop self-compacting concrete*. In: Rilem Proceedings PRO 33, 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete (Wallevik, O.; Nielsson, I. (Ed.)), 17.-20. August 2003, Reykjavik, Island, S. 23-31
- [Wal99] Walraven, J. C.; Takada, K.: *Selbstverdichtender Beton*. In: Zement und Beton 45 (1999), Nr. 1, S. 23-26
- [Wes73] Wesche, K.; vom Berg, W.: *Rheologische Eigenschaften von Zementleim und Frischbeton*. In: beton 23 (1973), Nr. 1, S. 21-27
- [Wes93] Wesche, K.: *Baustoffe für tragende Bauteile. Band 2 - Beton und Mauerwerk*. Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 3. Auflage, 1993
- [Wie83] Wierig, H. J.; Nelskamp, H.: *Messstreuungen bei der Prüfung der Frischbetonkonsistenz*. In: beton 33 (1983), Nr. 10, S. 380-384
- [Wol85] Wolter, G.: *Messung der relativen Viskosität von Zementmörteln: Messprinzip und Anwendungsbereiche*. In: Betonwerk+Fertigteile-Technik 51 (1985), Nr. 12, S. 816-824
- [Yam01a] Yamada, K.; Hanehara, S.: *Interaction mechanism of cement and superplasticizers – The roles of polymer adsorption and ionic conditions of aqueous phase*. In: Concrete Science and Engineering 3 (2001), Nr. 11, S. 135-145
- [Yam01b] Yamada, K.; Ogawa, S.; Hanehara, S.: *Controlling of the adsorption and dispersing force of polycarboxylate-type superplasticizers by sulfate ion concentration in aqueous phase*. In: Cement and Concrete Research 31 (2001), Nr. 3, S. 375-383
- [Yos02] Yoshioka, K.; Tazawa, E.; Kawai, K.; Enohata, T.: *Adsorption characteristics of superplasticizers on cement component minerals*. In: Cement and Concrete Research 32 (2002), Nr. 10, S. 1507-1513

- [Yur98] Yurugi, M.; Sakai, G.: *A proven QA system for flowable concrete*.
In: Concrete International 10 (1998), Nr. 10, S. 44-48

11 Anhang

11.1 Anhang A, Ergebnisse der physikalisch-chemischen Untersuchungen an den mehlfeinen Stoffe

Tafel A.1: Chemisch-mineralogische Zusammensetzungen der Zemente in M.-%, glühverlustfrei

Schlüsselnummer	ZI.1	ZI.2	ZI.3	ZIII.1	ZIII.2
Wasser	0,58	0,81	0,77	0,75	0,71
Kohlendioxid	1,88	1,62	0,75	0,42	2,11
Silizium(IV)-oxid	20,04	20,53	19,82	29,95	27,63
Aluminiumoxid	5,45	5,81	5,81	9,74	8,39
Titandioxid	0,25	0,26	0,25	0,47	0,49
Phosphor(V)-oxid	0,14	0,11	0,07	0,04	0,03
Eisen(III)-oxid	2,94	2,37	3,37	1,10	0,96
Mangan(III)-oxid	0,09	0,06	0,05	0,23	0,18
Calciumoxid	63,82	63,31	62,53	48,16	49,62
Magnesiumoxid	1,17	1,20	1,63	5,69	5,88
Sulfat als SO ₃	2,85	2,83	3,28	2,24	2,74
Kaliumoxid	0,65	0,93	1,44	0,63	0,59
Natriumoxid	0,13	0,13	0,22	0,26	0,28
Natriumäquivalent	0,56	0,74	1,17	0,67	0,67
Hüttensandgehalt	-	-	-	64	65
C ₃ S	62,10	55,40	55,82	-	-
C ₂ S	12,09	18,55	15,62	-	-
C ₃ A	9,72	11,66	9,85	-	-
C ₄ AF	9,16	7,39	10,41	-	-

Tafel A.2: Chemisch-mineralogische Zusammensetzungen der Füller in M.-%, glühverlustfrei

Schlüsselnummer	KM1	KM2	KM3	KM4	KM5	GK1	FA1	FA2
Wasser	0,23	0,15	0,08	0,18	0,13	n.b.	0,28	0,23
Kohlendioxid	44,17	44,05	43,97	42,72	43,57	n.b.	0,06	0,08
Silizium(IV)-oxid	0,01	0,01	0,01	0,61	0,47	70-75	45,33	49,40
Aluminiumoxid	0,01	0,01	0,01	0,14	0,01	< 2,5	28,98	26,55
Titandioxid	0,02	0,02	0,02	0,05	0,03	n.b.	1,18	1,09
Phosphor(V)-oxid	0,02	0,1	0,01	0,01	0,01	n.b.	0,78	0,25
Eisen(III)-oxid	0,01	0,01	0,01	0,05	0,1	< 0,5	10,59	7,52
Mangan(III)-oxid	0,01	0,01	0,01	0,03	0,02	n.b.	0,15	0,13
Calciumoxid	55,25	55,43	55,61	55,58	55,19	7-12	4,06	3,44
Magnesiumoxid	0,21	0,24	0,22	0,45	0,42	< 5	2,14	2,76
Sulfat als SO ₃	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	< 0,5	0,64	0,45
Kaliumoxid	0,01	0,01	0,01	0,06	0,02	< 1,5	3,13	3,83
Natriumoxid	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	12-15	1,16	1,10
Natriumäquivalent	0,02	0,02	0,02	0,06	0,02	n.b.	3,22	3,62
Methylenblauwert in g / 100 g Füller	n.b.	n.b.	n.b.	0,07	0,03	n.b.	-	-

n.b. nicht bestimmt

Tafel A.3: Physikalische Eigenschaften der Zemente

Schlüsselnummer		ZI.1	ZI.2	ZI.3	ZIII.1	ZIII.2
Erstarren	min	225	210	245	195	185
Wasseranspruch	%	25,5	26,0	29,0	30,5	29,0
Normsteifemaß	mm	5	5	6	6	7
Raumbeständigkeit	mm	1,0	0,5	1,0	0	1,0
Spez. Oberfläche	cm ² /g	2880	3240	3020	4110	3590
Dichte	g/cm ³	3,13	3,12	3,12	2,96	2,96
Druckfestigkeit	2d	N/mm ²	17,3	24,2	28,0	8,5
	7d	N/mm ²	39,4	n.b	40,3	24,7
	28d	N/mm ²	48,8	48,9	49,0	52,0
Biegezugfestigkeit	2d	N/mm ²	3,5	5,2	5,6	2,0
	7d	N/mm ²	6,7	n.b.	7,7	5,3
	28d	N/mm ²	8,0	9,2	8,8	8,4

n.b. nicht bestimmt

Tafel A.4: Physikalische Eigenschaften der Füller

Schlüsselnummer		KM1	KM2	KM3	KM4	KM5	GK1	FA1	FA2
Wasseranspruch	%	34,5	29,0	26,5	28,0	21,0	-	31,5	26,0
Normsteifemaß	mm	5	6	5	5	6	-	7	6
Dichte	g/cm ³	2,71	2,71	2,71	2,71	2,72	2,46	2,28	2,25
Spez. Oberfläche	cm ² /g	<10000	6900	3200	4900	3300	600	-	-

11.2 Anhang B, Ergebnisse der granulometrischen Untersuchungen an den mehlfeinen Stoffe

Tafel B.1: Kennwerte der Mehlkornhaufwerke KM1, KM2 und KM3

Bezeichnung KM1/KM2/KM3	RRSB			Wasseran- spruch β_p	Hg-Penetration		Visko- mat T
	x' μm	n	r^2 %		V_{por} Vol.-%	V_{cum} mm^3/g	
Vol.-%	μm	-	%	Vol.-%	Vol.-%	mm^3/g	Nmm
100/0/0	2,7	1,54	0,9941	1,521	63,2	581,7	250,0
75/25/0	3,4	1,19	0,9764	1,390	59,3	541,0	193,2
50/50/0	4,4	1,00	0,9706	1,184	60,0	493,7	126,8
25/75/0	5,5	0,94	0,9759	1,033	53,6	440,0	70,6
0/100/0	7,0	0,96	0,9842	0,978	55,1	435,3	46,4
100/0/0	2,7	1,54	0,9941	1,521	63,2	581,7	250,0
75/0/25	3,9	0,98	0,9607	1,053	59,8	504,2	156,8
50/0/50	5,9	0,79	0,9580	0,921	54,5	414,8	51,4
25/0/75	9,6	0,76	0,9724	0,803	52,8	350,8	15,7
0/0/100	17,6	0,86	0,9867	0,770	51,9	361,6	15,9
0/100/0	7,0	0,96	0,9842	0,978	55,1	435,3	46,4
0/75/25	8,7	0,90	0,9829	0,945	55,8	393,0	27,4
0/50/50	10,4	0,87	0,9842	0,904	53,1	387,4	16,5
0/25/75	13,3	0,86	0,9849	0,814	51,4	359,4	10,2
0/0/100	17,6	0,86	0,9867	0,770	51,9	361,6	15,9
50/25/25	5,0	0,90	0,9627	1,102	55,2	453,2	81,0
25/50/25	6,6	0,89	0,9713	0,891	55,0	397,3	44,8
25/25/50	8,2	0,80	0,9704	0,831	51,2	381,8	26,6

Tafel B.2: Kennwerte der Mehlkornhaufwerke KM4, KM5 und GK1

Bezeichnung KM4/KM5/GK1	RRSB			Wasseran- spruch β_p	Hg-Penetration		Visko- mat T
	x' μm	n -	r^2 %		V_{por} Vol.-%	V_{cum} mm^3/g	
Vol.-%	μm	-	%	Vol.-%	Vol.-%	mm^3/g	Nmm
100/0/0	12,0	0,98	0,9936	0,960	50,2	373,0	24,3
75/25/0	12,7	0,92	0,9930	0,915	54,5	356,7	19,3
50/50/0	13,7	0,84	0,9902	0,852	44,9	340,3	15,2
25/75/0	15,0	0,76	0,9866	0,739	48,8	316,7	12,2
0/100/0	21,3	0,69	0,9783	0,722	46,6	296,2	9,9
100/0/0	12,0	0,98	0,9936	0,960	50,2	373,0	24,3
75/0/25	15,0	0,91	0,9900	0,851	48,9	324,3	9,4
50/0/50	19,7	0,87	0,9828	0,670	45,5	279,5	3,5
25/0/75	39,4	1,07	0,9469	0,554	43,7	262,8	2,3
0/0/100	47,9	1,56	0,9398	0,538	24,1	127,4	2,1
0/100/0	21,3	0,69	0,9783	0,722	46,6	296,2	9,9
0/75/25	25,8	0,72	0,9767	0,653	44,0	288,7	4,8
0/50/50	33,9	0,81	0,9597	0,598	43,5	264,5	3,4
0/25/75	37,4	0,89	0,9448	0,576	35,7	213,1	2,9
0/0/100	47,9	1,56	0,9398	0,538	24,1	127,4	2,1
50/25/25	17,7	0,84	0,9884	0,723	47,5	313,1	7,2
25/50/25	20,6	0,77	0,9842	0,693	43,6	287,6	5,6
25/25/50	26,0	0,81	0,9714	0,662	45,5	280,0	3,0

Tafel B.3: Kennwerte der Mehlkornhaufwerke KM4, KM5 und FA1

Bezeichnung KM4/KM5/FA1	RRSB			Wasseran- spruch β_p	Hg-Penetration		Visko- mat T
	x' μm	n -	r^2 %		V_{por} Vol.-%	V_{cum} mm^3/g	
Vol.-%	μm	-	%	Vol.-%	Vol.-%	mm^3/g	Nmm
100/0/0	12,0	0,98	0,9936	0,960	50,2	373,0	24,3
75/25/0	12,7	0,92	0,9930	0,915	54,5	356,7	19,3
50/50/0	13,7	0,84	0,9902	0,852	44,9	340,3	15,2
25/75/0	15,0	0,76	0,9866	0,739	48,8	316,7	12,2
0/100/0	21,3	0,69	0,9783	0,722	46,6	296,2	9,9
100/0/0	12,0	0,98	0,9936	0,960	50,2	373,0	24,3
75/0/25	13,3	0,92	0,9935	0,713	50,8	377,9	3,9
50/0/50	16,3	0,82	0,9886	0,712	50,8	349,6	3,6
25/0/75	19,7	0,75	0,9867	0,694	46,7	347,3	3,8
0/0/100	24,5	0,73	0,9807	0,666	48,4	383,0	2,4
0/100/0	21,3	0,69	0,9783	0,722	46,6	296,2	9,9
0/75/25	22,1	0,70	0,9812	0,867	45,0	293,3	10,2
0/50/50	22,6	0,71	0,9768	0,830	44,0	307,8	5,8
0/25/75	24,4	0,72	0,9799	0,744	45,8	326,8	5,2
0/0/100	24,5	0,73	0,9807	0,666	48,4	383,0	2,4
50/25/25	17,1	0,83	0,9917	0,817	47,8	345,8	6,5
25/50/25	21,5	0,79	0,9920	0,764	47,8	315,5	4,9
25/25/50	20,2	0,79	0,9894	0,760	44,4	322,0	4,8

Tafel B.4: Kennwerte der Mehlkornhaufwerke ZI.2 und KM5

Bezeichnung ZI.2/KM5	RRSB			Wasseran- spruch β_p	Hg-Penetration		Visko- mat T
	x'	n	r^2		V_{por}	V_{cum}	
Vol.-%	μm	-	%	Vol.-%	Vol.-%	mm^3/g	Nmm
100/0	27,3	0,77	0,9830	1,084	51,9	316,2	85,5
72/28	25,1	0,74	0,9830	1,027	48,3	283,6	67,5
46/54	23,6	0,72	0,9828	0,995	46,4	293,2	43,9
40/60	23,0	0,72	0,9824	0,987	45,9	303,0	38,5
22/78	21,7	0,71	0,9809	0,932	46,4	298,6	21,3
0/100	21,3	0,69	0,9783	0,722	46,6	296,2	9,9

Tafel B.5: Kennwerte der Mehlkornhaufwerke ZIII.1 und FA1

Bezeichnung ZIII.1/FA1	RRSB			Wasseran- spruch β_p	Hg-Penetration		Visko- mat T
	x'	n	r^2		V_{por}	V_{cum}	
Vol.-%	μm	-	%	Vol.-%	Vol.-%	mm^3/g	Nmm
100/0	14,6	1,02	0,9980	1,058	54,0	402,7	71,8
70/30	15,4	0,98	0,9846	0,956	53,0	404,0	61,5
42/58	21,8	0,82	0,9918	0,902	48,6	398,5	36,1
38/62	22,4	0,81	0,9918	0,897	50,2	388,4	32,0
20/80	24,3	0,79	0,9911	0,796	48,5	397,0	24,8
0/100	26,34	0,82	0,9832	0,666	48,4	383,0	2,4

11.3 Anhang C, Untersuchungen an ausgewählten Fließmitteln

Tafel C.1: Physikalische Kennwerte der Fließmittel

Schlüsselnummer		PCE 1	PCE 2	PCE 3	NNS	NMS
Feststoffgehalt	%	34,9	35,1	35,4	20,6	20,2
Dichte	g/ml	1,08	1,07	1,02	1,07	1,07
pH-Wert	-	6,86	6,27	6,78	7,84	9,28
Brechungsindex	-	1,3894	1,3861	1,3598	1,4573	1,3748
Oberflächenspannung	mN/m	34,9	41,7	29,3	67,3	64,9

Tafel C.2: Sättigungsdosierungen der untersuchten Zement-Fließmittelkombinationen

Wirkstoffgehalt für Sättigung in M.-% v. z					
Schlüsselnummer	PCE 1	PCE 2	PCE 3	NNS	NMS
ZI.1	0,09	0,08	0,19	0,22	0,25
ZI.2	0,10	0,10	0,19	0,25	0,34
ZI.3	0,11	0,21	0,22	0,31	0,36

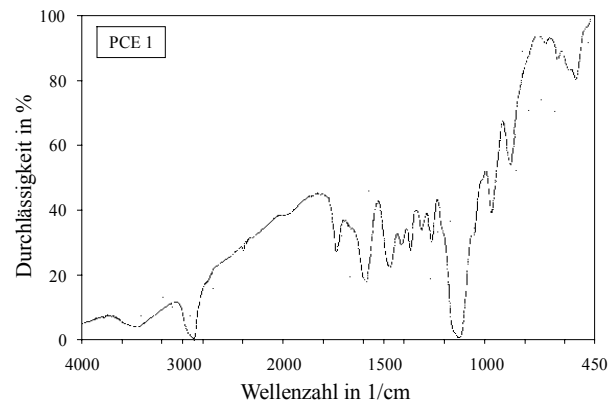


Bild C.1: Infrarotspektrum von PCE1

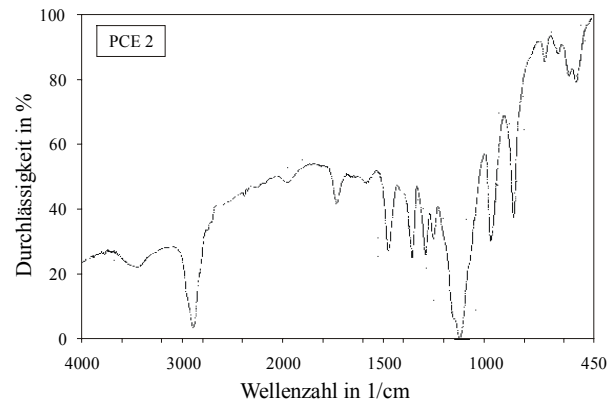


Bild C.2: Infrarotspektrum von PCE2

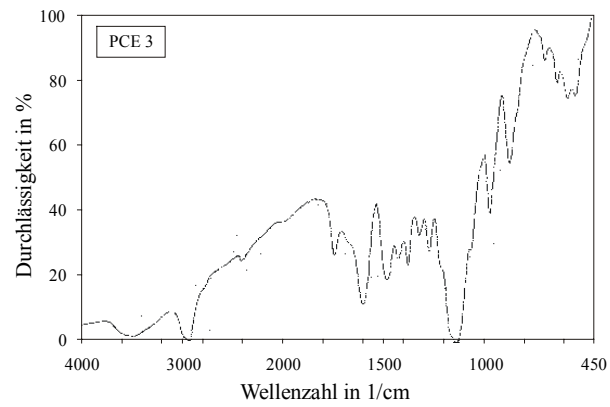


Bild C.3: Infrarotspektrum von PCE3

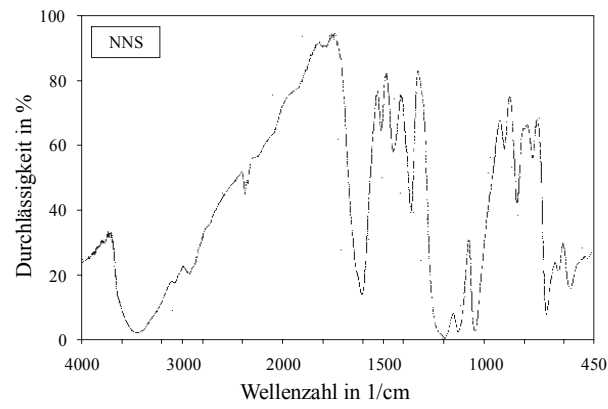


Bild C.4: Infrarotspektrum von NNS

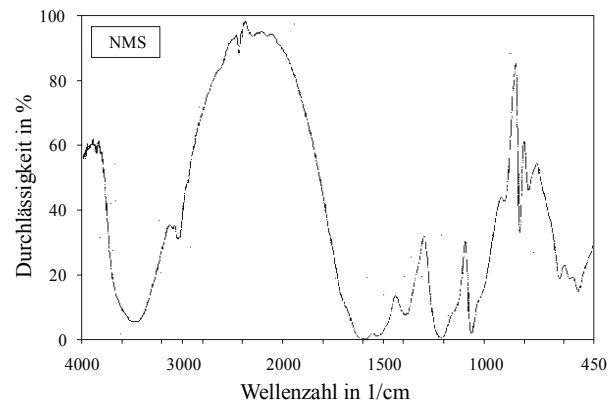


Bild C.5: Infrarotspektrum von NMS

Tafel C.3: Zusammensetzung der optimierten Mörtel

Kombination		w/z	z	w	FM-Wirkstoff
		-	g	g	M.-% v.z
ZI.1	PCE 1	0,355	737,9	262,0	0,09
	PCE 2				0,08
	PCE 3				0,19
	NNS				0,22
	NMS				0,25
ZI.2	PCE 1	0,360	732,5	263,7	0,10
	PCE 2				0,10
	PCE 3				0,19
	NNS				0,25
	NMS				0,34
ZI.3	PCE 1	0,390	701,7	273,7	0,11
	PCE 2				0,21
	PCE 3				0,22
	NNS				0,31
	NMS				0,36

Tafel C.4: Anfangsverflüssigung a_0 sowie Dauer der Verflüssigung t_v

Kombination	Z1.1		Z1.2		Z1.3	
	a_0 cm	t_v min	a_0 cm	t_v min	a_0 cm	t_v min
PCE 1	19,3	210	18,5	270	18,6	360
PCE 2	17,8	90	15,0	150	26,9	360
PCE 3	16,7	120	16,2	180	27,0	300
NNS	18,1	120	17,2	270	17,2	180
NMS	17,5	150	16,2	210	15,8	150

11.4 Anhang D, Untersuchungen an selbstverdichtenden Mörteln

Tafel D.1: Zeitliche Veränderung der rheometrischen Kenngrößen Fließgrenze g und plastische Viskosität h für Mörtel PK168

PK 168								
PCE in M.-% v. z	0,7		0,8		0,9		1,0	
t min	g Nmm	h Nmm·s	g Nmm	h Nmm·s	g Nmm	h Nmm·s	g Nmm	h Nmm·s
0	18,4	111	0,0	119	0,0	81	0,0	99
20	41,6	246	7,4	175	0,9	130	0,0	163
40			25,5	251	9,6	174	2,5	194
60					19,7	231	10,3	260
90								

Tafel D.2: Zeitliche Veränderung der rheometrischen Kenngrößen Fließgrenze g und plastische Viskosität h für Mörtel PK173

PK 173								
PCE in M.-% v. z	0,7		0,8		0,9		1,0	
t min	g Nmm	h Nmm·s	g Nmm	h Nmm·s	g Nmm	h Nmm·s	g Nmm	h Nmm·s
0	10,0	87	0,4	83	0,6	64	0,2	51
20	34,0	241	13,3	138	5,0	96	0,0	61
40			34,2	201	9,1	144	0,0	84
60					23,9	234	0,0	122
90								

Tafel D.3: Zeitliche Veränderung der rheometrischen Kenngrößen Fließgrenze g und plastische Viskosität h für Mörtel PK181

PK 181								
PCE in M.-% v. z	0,7		0,8		0,9		1,0	
t min	g Nmm	h Nmm·s	g Nmm	h Nmm·s	g Nmm	h Nmm·s	g Nmm	h Nmm·s
0	6,7	63	0,5	40	0,0	44	0,0	45
20	18,6	126	0,8	51	0,0	56	0,0	56
40	33,1	157	3,3	72	1,0	89	1,1	91
60	48,7	204	6,1	87	5,2	95	4,5	107
90			16,5	109	14,3	119	13,3	131

Tafel D.4: Zeitliche Veränderung der rheologischen Hilfsgrößen Setzfließmaß sm_m und Trichterauslaufzeit T_m für Mörtel PK168

PK 168								
PCE in M.-% v. z	0,7		0,8		0,9		1,0	
t min	sm_m mm	T_m s	sm_m mm	T_m s	sm_m mm	T_m s	sm_m mm	T_m s
0	280	9,2	340	8,3	328	8,9	338	7,8
10	198	17,9	328	9,0	323	9,0	335	8,5
20	120	28,2	265	11,1	293	9,5	318	9,6
30			220	13,4	248	12,0	285	12,8
45			165	22,1	193	16,8	235	15,7
60			120	38,6	165	17,8	185	20,6
75					138	28,4	155	33,5
90							120	41,3
105								
120								

Tafel D.5: Zeitliche Veränderung der rheologischen Hilfsgrößen Setzfließmaß sm_m und
Trichterauslaufzeit T_m für Mörtel PK173

PK 173								
PCE in M.-% v. z.	0,7		0,8		0,9		1,0	
t min	sm_m mm	T_m s	sm_m mm	T_m s	sm_m mm	T_m s	sm_m mm	T_m s
0	295	7,4	330	7,2	315	8,2	345	6,3
10	189	12,5	303	8,0	313	8,6	333	6,8
20	143	21,5	243	10,6	279	10,2	335	7,8
30			185	16,3	229	11,4	320	8,2
45			147	24,5	209	14,7	307	9,6
60					170	20,5	293	10,1
75					140	41,4	273	13,8
90							230	15,9
105							190	20,7
120							138	43,9

Tafel D.6: Zeitliche Veränderung der rheologischen Hilfsgrößen Setzfließmaß sm_m und
Trichterauslaufzeit T_m für Mörtel PK181

PK 181								
PCE in M.-% v. z.	0,7		0,8		0,9		1,0	
t min	sm_m mm	T_m s	sm_m mm	T_m s	sm_m mm	T_m s	sm_m mm	T_m s
0	318	6,0	345	5,0	338	5,2	350	4,8
10	260	6,8	340	5,3	338	5,8	348	4,7
20	200	8,4	335	6,1	328	6,1	335	5,4
30	163	11,6	280	6,2	290	6,5	333	5,9
45	138	14,1	280	7,5	258	7,7	300	7,5
60			225	9,6	220	9,8	270	8,5
75			210	10,7	200	11,3	223	9,6
90			183	14,4	173	16,5	205	12,4
105			138	15,5	133	19,7	175	15,4
120							143	24,2

11.5 Anhang E, Untersuchungen an selbstverdichtenden Betonen

Tafel E.1: Setzfließmaße sm für die Betone SVB 1 und SVB 2

Zeit	SVB 1				SVB 2		
	SVB 1.1	SVB 1.2	SVB 1.3	SVB 1.4	SVB 2.1	SVB 2.2	SVB 2.3
t	sm	sm	sm	sm	sm	sm	sm
min	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
0	690	710	750	770	710	720	740
30	680	690	670	720	680	690	720
60	600	600	660	700	600	680	680
90	420	370	530	680	360	620	670
95	680	660		-	660	-	-
120	610	530		580	500	430	550
125	-					680	710
150	460					660	640

Tafel E.2: Trichterauslaufzeiten T für die Betone SVB 1 und SVB 2

Zeit	SVB 1				SVB 2		
	SVB 1.1	SVB 1.2	SVB 1.3	SVB 1.4	SVB 2.1	SVB 2.2	SVB 2.3
t	T	T	T	T	T	T	T
min	s	s	s	s	s	s	s
0	6	6	6	7	10	5	5
30	10	7	8	6	10	7	6
60	13	11	10	7	17	8	8
90	22	22	18	6	25	11	9
95	8	18		-	17	-	-
120	15	18		15	34	22	12
125	-					7	7
150	21					9	12

Tafel E.3: Setzfließmaße sm für die Betone SVB 3

Zeit	SVB 3				
	SVB 3.1	SVB 3.2	SVB 3.3	SVB 3.4	SVB 3.5
t	sm	sm	sm	sm	sm
min	mm	mm	mm	mm	mm
0	790	810	780	820	820
30	500	670	730	780	740
35	810	-	-	-	-
60	780	530	660	740	630
65	-	780	-	-	-
90	720	750	610	700	580
120	660	660	600	680	510
125		-		-	800
150		610		660	780

Tafel E.4: Trichterauslaufzeiten T für die Betone SVB 3

Zeit	SVB 3				
	SVB 3.1	SVB 3.2	SVB 3.3	SVB 3.4	SVB 3.5
t	T	T	T	T	T
min	s	s	s	s	s
0	13	9	11	11	8
30	22	13	12	15	12
35	14	-	-	-	-
60	16	18	12	16	15
65	-	9	-	-	-
90	20	11	14	19	15
120	21	14	16	22	16
125		-		-	10
150		18		22	12

Tafel E.5: Setzfließmaße sm für die Betone SVB 4 und SVB 5

Zeit	SVB 4						SVB 5		
	SVB 4.1	SVB 4.2	SVB 4.3	SVB 4.4	SVB 4.5	SVB 4.6	SVB 5.1	SVB 5.2	SVB 5.3
t	sm	sm	sm	sm	sm	sm	sm	sm	sm
min	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
0	740	800	880	870	820	900	860	900	850
30	490	800	810	850	500	790	480	820	770
35	680	-	-	-	830	-	790	-	-
60		480	710	850	780	700	770	690	580
65		810	-	-	-	-	-	-	820
90		770	380	840	590	400	640	570	740
95		-		-		800	-	830	-
120		640		800		720	510	800	620

Tafel E.6: Trichterauslaufzeiten T für die Betone SVB 4 und SVB 5

Zeit	SVB 4						SVB 5		
	SVB 4.1	SVB 4.2	SVB 4.3	SVB 4.4	SVB 4.5	SVB 4.6	SVB 5.1	SVB 5.2	SVB 5.3
t	T	T	T	T	T	T	T	T	T
min	s	s	s	s	s	s	s	s	s
0	30	15	13	15	12	10	8	7	7
30	50	28	20	19	33	19	22	8	8
35	22		-	-	10	-	8	-	-
60		50	29	21	14	28	9	9	11
65		16	-	-	-	-	-	-	7
90		22	40	30	24	50	12	14	8
95		-		-		15	-	7	-
120		33		39		19	15	8	16

11.6 Anhang F, Untersuchungen an selbstverdichtenden Mörteln und Betonen in unterschiedlichen Temperaturbereichen

Tafel F.1: Zeitliche Veränderung der rheologischen Hilfsgrößen Setzfließmaß sm_m und Trichterauslaufzeit T_m für Mörtel ZF08 bei 8 °C

ZF08								
PCE in M.-% v. z	2,0		2,2		2,4		2,6	
t min	sm_m mm	T_m s	sm_m mm	T_m s	sm_m mm	T_m s	sm_m mm	T_m s
0	303	6,9	368	6,3	350	6,4	363	5,9
10	283	7,1	348	6,3	358	6,2	350	6,1
20	253	7,1	328	6,2	353	5,5	348	5,4
30	238	7,7	308	6,6	358	5,4	353	5,4
45	210	8,9	300	6,7	348	5,6	338	5,3
60	190	9,5	293	7,2	343	5,9	345	,9
75	165	11,0	283	7,5	325	6,1	338	6,3
90	168	11,8	268	8,3	328	5,6	318	6,7
105			243	8,6	318	6,0	333	7,0
120			223	9,5	268	6,4	295	7,1
135			200	10,5	260	6,8	278	7,8
150					235	7,4	263	8,2
175					223	8,3	265	8,7
190					205	9,6	243	9,3

Tafel F.2: Zeitliche Veränderung der rheologischen Hilfsgrößen Setzfließmaß sm_m und Trichterauslaufzeit T_m für Mörtel ZF20 bei 20 °C

ZF20								
PCE in M.-% v. z	2,0		2,2		2,4		2,6	
t min	sm_m mm	T_m s	sm_m mm	T_m s	sm_m mm	T_m s	sm_m mm	T_m s
0	370	7,2	345	6,6	370	6,7	373	5,5
10	300	6,9	298	6,2	335	6,0	360	6,7
20	236	7,8	265	6,7	295	6,5	348	5,2
30	218	8,2	243	7,1	265	7,2	350	5,3
45	196	9,2	22	7,6	260	7,7	338	6,2
60	179	10,2	195	8,7	225	8,4	323	6,4
75	160	11,7	185	9,2	190	8,8	295	7,2
90	146	12,6	175	10,1	185	9,6	255	7,4
105			153	12,7	158	10,3	233	8,6
120					138	10,9	218	9,8
135							203	10,8
150							183	11,8
175							180	15,1
190								

Tafel F.3: Zeitliche Veränderung der rheologischen Hilfsgrößen Setzfließmaß sm_m und Trichterauslaufzeit T_m für Mörtel ZF30 bei 30 °C

ZF30								
PCE in M.-% v. z	2,0		2,2		2,4		2,6	
t min	sm_m mm	T_m s	sm_m mm	T_m s	sm_m mm	T_m s	sm_m mm	T_m s
0	233	7,9	298	5,5	328	5,7	333	5,7
10	153	10,3	183	9,8	280	6,7	320	5,2
20	150	10,0	163	10,0	228	8,0	303	5,6
30	140	9,2	163	11,3	210	8,6	278	5,9
45	135	14,2	155	14,5	208	8,7	265	6,4
60					205	8,9	243	7,5
75					198	9,4	228	8,3
90					188	9,6	218	8,6
105					170	10,2	208	9,1
120					165	120	195	10,8
135							183	12,4
150								
175								
190								

Tafel F.4: Zeitliche Veränderung der rheologischen Hilfsgrößen Setzfließmaß sm und Trichterauslaufzeit T in Abhängigkeit von der Temperatur

Nr.	SVB 5.2-08		SVB 5.2-20		SVB 5.2-30		SVB 5.4-30	
t min	sm mm	T s	sm mm	T s	sm mm	T s	sm mm	T s
0	820	8	900	7	840	7	890	7
20	-	-	-	-	500	11	-	-
25	-	-	-	-	730	8	-	-
30	820	9	820	8	840	5	790	9
50	-	-	-	-	780	7	-	-
60	780	10	690	9	-	-	760	11
70	-	-	-	-	740	7	-	-
90	630	13	570	14	-	-	680	14
95			830	7	730	8	-	-
120			800	15			580	19
125								